THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Jean-Claude LAURENT
Ingénieur ENSERG - Ingénieur IAG

Synthèse cellulaire des automates asynchrones définis par leurs graphes et intégration à grande échelle en technologie M.O.S.

Soutenue le 7 Février 1972, devant la Commission d'examen

JURY

MM. R. PAUTHENET		*Président*
R. PERRET	}	*Examinateurs*
R. DAVID	}	
J. LACOUR		*Invité*

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Jean-Claude LAURENT
Ingénieur ENSERG - Ingénieur IAG

Synthèse cellulaire des automates asynchrones définis par leurs graphes et intégration à grande échelle en technologie M.O.S.

Soutenue le 7 Février 1972, devant la Commission d'examen

JURY

MM.	R. PAUTHENET	*Président*
	R. PERRET	*Examinateurs*
	R. DAVID	
	J. LACOUR	*Invité*

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

LISTE DES PROFESSEURS

Président : Monsieur Michel SOUTIF
Vice-Président : Monsieur Gabriel CAU

PROFESSEURS TITULAIRES

MM.	ANGLES D'AURIAC Paul	Mécanique des fluides
	ARNAUD Georges	Clinique des maladies infectieuses
	ARNAUD Paul	Chimie
	AYANT Yves	Physique approfondie
Mme	BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM.	BARBIER Jean-Claude	Physique expérimentale
	BARBIER Reynold	Géologie appliquée
	BARJON Robert	Physique nucléaire
	BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
	BARRA Jean-René	Statistiques
	BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
	BENOIT Jean	Radioélectricité
	BESSON Jean	Electrochimie
	BEZES Henri	Chirurgie générale
	BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
	BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
	BONNET Georges	Electrotechnique
	BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
	BONNET-EYMARD Joseph	Pathologie médicale
	BONNIER Etienne	Electrochimie Electrométallurgie
	BOUCHERLE André	Chimie et Toxicologie
	BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
	BRAVARD Yves	Géographie
	BRISSONNEAU Pierre	Physique du Solide
	BUYLE-BODIN Maurice	Electronique
	CABANAC Jean	Pathologie chirurgicale
	CABANEL Guy	Clinique rhumatologique et hydrologie
	CALAS François	Anatomie
	CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
	CAU Gabriel	Médecine légale et Toxicologie
	CAUQUIS Georges	Chimie organique
	CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
	CHARACHON Robert	Oto-Rhino-Laryngologie
	CHATEAU Robert	Thérapeutique
	CHENE Marcel	Chimie papetière
	COEUR André	Pharmacie chimique
	CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
	COUDERC Pierre	Anatomie Pathologique
	CRAYA Antoine	Mécanique
Mme	DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM.	DEBELMAS Jacques	Géologie générale
	DEGRANGE Charles	Zoologie
	DESSAUX Georges	Physiologie animale
	DODU Jacques	Mécanique appliquée
	DREYFUS Bernard	Thermodynamique
	DUCROS Pierre	Cristallographie

MM.	DUGOIS Pierre	Clinique de Dermatologie et Syphiligraphie
	FAU René	Clinique neuro-psychiatrique
	FELICI Noël	Electrostatique
	GAGNAIRE Didier	Chimie phyqieue
	GALLISSOT François	Mathématiques pures
	GALVANI Octave	Mathématiques pures
	GASTINEL Noël	Analyse numérique
	GERBER Robert	Mathématiques pures
	GIRAUD Pierre	Géologie
	KLEIN Joseph	Mathématiques pures
Mme	KOFLER Lucie	Botanique et Physiologie végétale
MM.	KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques pures
	KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
	KUNTZMANN Jean	Mathématiques appliquées
	LACAZE Albert	Thermodynamique
	LACHARME Jean	Biologie végétale
	LATREILLE René	Chirurgie générale
	LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
	LAURENT Pierre	Mathématiques appliquées
	LEDRU Jean	Clinique médicale B
	LLIBOUTRY Louis	Géophysique
	LOUP Jean	Géographie
Mle	LUTZ Elisabeth	Mathématiques pures
MM.	MALGRANGE Bernard	Mathématiques pures
	MALINAS Yves	Clinique obstétricale
	MARTIN-NOEL Pierre	Seméiologie médicale
	MASSEPORT Jean	Géographie
	MAZARE Yves	Clinique médicale A
	MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
	MOURIQUAND Claude	Histologie
	MOUSSA André	Chimie nucléaire
	NEEL Louis	Physique du solide
	OZENDA Paul	Botanique
	PAUTHENET René	Electrotechnique
	PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques pures
	PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
	PERRET René	Servomécanismes
	PILLET Emile	Physique industrielle
	RASSAT André	Chimie systématique
	RENARD Michel	Thermodynamique
	REULOS René	Physique industrielle
	RINALDI Renaud	Physique
	ROGET Jean	Clinique de pédiatrie et de puériculture
	SANTON Lucien	Mécanique
	SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
	SENGEL Philippe	Zoologie
	SILBERT Robert	Mécanique des fluides
	SOUTIF Michel	Physique générale
	TANCHE Maurice	Physiologie
	TRAYNARD Philippe	Chimie générale
	VAILLAND François	Zoologie
	VAUQUOIS Bernard	Calcul électronique
Mme	VERAIN Alice	Pharmacie galénique
M.	VERAIN André	Physique
Mme	VEYRET Germaine	Géographie
MM.	VEYRET Paul	Géographie
	VIGNAIS Pierre	Biochimie médicale
	YOCCOZ Jean	Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM.	BULLEMER Bernhard	Physique
	RADHAKRISHNA Pidatala	Thermodynamique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM.	AUBERT Guy	Physique
	BEAUDOING André	Pédiatrie
	BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques appliquées
	BIAREZ Jean-Pierre	Mécanique
	BONNETAIN Lucien	Chimie minérale
Mme	BONNIER Jane	Chimie générale
MM.	CARLIER Georges	Biologie végétale
	COHEN Joseph	Electrotechnique
	COUMES André	Radioélectricité
	DEPASSEL Roger	Mécanique des fluides
	DEPORTES Charles	Chimie minérale
	DESRE Pierre	Métallurgie
	DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
	GAUTHIER Yves	Sciences biologiques
	GEINDRE Michel	Electroradiologie
	GIDON Paul	Géologie et Minéralogie
	GLENAT René	Chimie organique
	HACQUES Gérard	Calcul numérique
	JANIN Bernard	Géographie
Mme	KAHANE Josette	Physique
MM.	MULLER Jean-Michel	Thérapeutique
	PERRIAUX Jean-Jacques	Géologie et minéralogie
	POULOUJADOFF Michel	Electrotechnique
	REBECQ Jacques	Biologie (CUS)
	REVOL Michel	Urologie
	REYMOND Jean-Charles	Chirurgie générale
	ROBERT André	Chimie papetière
	SARRAZIN Roger	Anatomie et chirurgie
	SARROT-REYNAULD Jean	Géologie
	SIBILLE Robert	Construction Mécanique
	SIROT Louis	Chirurgie générale
Mme	SOUTIF Jeanne	Physique générale
M.	VALENTIN Jacques	Physique nucléaire

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

Mle	AGNIUS-DELORD Claudine	Physique pharmaceutique
	ALARY Josette	Chimie analytique
MM.	AMBLARD Pierre	Dermatologie
	AMBROISE-THOMAS Pierre	Parasitologie
	ARMAND Yves	Chimie
	BEGUIN Claude	Chimie organique
	BELORIZKY Elie	Physique
	BENZAKEN Claude	Mathématiques appliquées
Mme	BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques pures
MM.	BLIMAN Samuel	Electronique (EIE)
	BLOCH Daniel	Electrotechnique
Mme	BOUCHE Liane	Mathématiques (CUS)
MM.	BOUCHET Yves	Anatomie
	BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques appliquées
	BOUVARD Maurice	Mécanique des fluides
	BRIERE Georges	Physique expérimentale

MM.	BRODEAU François	Mathématiques (IUT B)
	BRUGEL Lucien	Energétique
	BUISSON Roger	Physique
	BUTEL Jean	Orthopédie
	CHAMBAZ Edmond	Biochimie médicale
	CHAMPETIER Jean	Anatomie et organogénèse
	CHIAVERINA Jean	Biologie appliquée (EFP)
	CHIBON Pierre	Biologie animale
	COHEN-ADDAD Jean-Pierre	Spectrométrie physique
	COLOMB Maurice	Biochimie médicale
	CONTE René	Physique
	CROUZET Guy	Radiologie
	DURAND Francis	Métallurgie
	DUSSAUD René	Mathématiques (CUS)
Mme	ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie
MM.	FAURE Jacques	Médecine légale
	GAVEND Michel	Pharmacologie
	GENSAC Pierre	Botanique
	GERMAIN Jean-Pierre	Mécanique
	GIDON Maurice	Géologie
	GRIFFITHS Michaël	Mathématiques appliquées
	GROULADE Joseph	Biochimie médicale
	HOLLARD Daniel	Hématologie
	HUGONOT Robert	Hygiène et médecine préventive
	IDELMAN Simon	Physiologie animale
	IVANES Marcel	Electricité
	JALBERT Pierre	Histologie
	JOLY Jean-René	Mathématiques pures
	JOUBERT Jean-Claude	Physique du solide
	JULLIEN Pierre	Mathématiques pures
	KAHANE André	Physique générale
	KUHN Gérard	Physique
Mme	LAJZEROWICZ Jeannine	Physique
MM.	LAJZEROWICZ Joseph	Physique
	LANCIA Roland	Physique atomique
	LE JUNTER Noël	Electronique
	LEROY Philippe	Mathématiques
	LOISEAUX Jean-Marie	Physique nucléaire
	LONGEQUEUE Jean-Pierre	Physique nucléaire
	LUU DUC Cuong	Chimie organique
	MACHE Régis	Physiologie végétale
	MAGNIN Robert	Hygiène et médecine préventive
	MARECHAL Jean	Mécanique
	MARTIN-BOUYER Michel	Chimie (CUS)
	MAYNARD Roger	Physique du solide
	MICOUD Max	Maladies infectieuses
	MOREAU René	Hydraulique (INP)
	NEGRE Robert	Mécanique
	PARAYELLE Bernard	Pneumologie
	PECCOUD François	Analyse (IUT B)
	PEFFEN René	Métallurgie
	PELMONT Jean	Physiologie animale
	PERRET Jean	Neurologie
	PERRIN Louis	Pathologie expérimentale
	PFISTER Jean-Claude	Physique du solide
	PHELIP Xavier	Rhumatologie
Mlle	PIERY Yvette	Biologie animale

MM.	RACHAIL Michel	Médecine interne
	RACINET Claude	Gynécologie et obstétrique
	RICHARD Lucien	Botanique
Mme	RINAUDO Marguerite	Chimie macromoléculaire
MM.	ROMIER Guy	Mathématiques (IUT B)
	ROUGEMONT (DE) Jacques	Neuro-Chirurgie
	STIEGLITZ Paul	Anesthésiologie
	STOEBNER Pierre	Anatomie pathologique
	VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques appliquées
	VEILLON Gérard	Mathématiques appiquées (INP)
	VIALON Pierre	Géologie
	VOOG Robert	Médecine interne
	VROUSSOS Constantin	Radiologie
	ZADWORNY François	Electronique

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

MM.	BOUDOURIS Georges	Radioélectricité
	CHEEKE John	Thermodynamique
	GOLDSCHMIDT Hubert	Mathématiques
	YACOUD Mahmoud	Médecine légale

CHARGES DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

Mme	BERIEL Hélène	Physiologie
Mme	RENAUDET Jacqueline	Microbiologie

Ce mémoire de thèse relatant notre travail de chercheur, doit son existence à l'étude précédemment effectuée par R. DAVID dans le domaine des systèmes séquentiels et en présente un de ses prolongements.

Nous remercions Monsieur le Professeur R. PAUTHENET, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique et de Génie Physique de GRENOBLE, qui nous a fait l'honneur d'accepter de présider notre Jury de thèse.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur le Professeur R. PERRET qui, par son enseignement, nous a incité à la recherche et en nous accueillant au Laboratoire d'Automatique, nous a permis de trouver les moyens propices à notre travail. Nous le remercions de l'honneur qu'il nous fait pour sa participation au Jury.

Nous remercions Monsieur J. LACOUR de nous avoir permis de réaliser la cellule dans son Laboratoire du Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE. Nous sommes honorés de sa participation au Jury de cette thèse.

Nous remercions R. DAVID dont les nombreux conseils et suggestions ont été d'une grande utilité dans l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, nous remercions l'équipe du Laboratoire d'Automatique et celle du Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique du Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE pour leur aide et plus particulièrement M . VERGNIAULT pour sa participation efficace à la simulation et réalisation de la cellule.

S O M M A I R E

Pages

0. INTRODUCTION 1

PARTIE 1 : Synthèse cellulaire des automates asynchrones définis par leurs graphes.

1. RAPPELS SUR LA SYNTHESE CELLULAIRE DES AUTOMATES PAR LA METHODE DE DAVID 7

1.1. Principe de fonctionnement. Conditions logiques 8
1.2. Aléas de fonctionnement. Conditions technologiques 10
1.3. Méthode de cablage 12
1.4. Méthode de simplification en partant du tableau d'états 13

2. SYNTHESE CELLULAIRE DES AUTOMATES DEFINIS PAR LEURS GRAPHES. 23

2.1. Définitions 23
2.2. Obtention du graphe fonctionnel 29
2.3. Simplifications du graphe fonctionnel ... 31
2.4. Exemples 35

Pages

PARTIE 2 : Intégration à grande échelle des automates asynchrones en technologie M.O.S. 47

3. ELEMENTS DE TECHNOLOGIE M.O.S. 48

3.1. Rappels sur le transistor M.O.S. 48
3.2. Le circuit logique élémentaire en technologie M.O.S. : la porte NI mono-entrée 54

4. DEFINITION ET DESCRIPTION DE LA CUSA 64

4.1. Caractéristiques générales 64
4.2. Etude des retards 66
4.3. Simulation et résultats 68
4.4. Résultats expérimentaux et comparaison .. 74

5. DESCRIPTION DU RESEAU INTEGRE DE CELLULES .. 84

5.1. Description générale du réseau 84
5.2. Caractéristiques de la puce 86

6. APPLICATION 90

6.1. Description du réseau câblé 90
6.2. Résultats 96

7. CONCLUSION 108

Pages

Annexe 1 : Programme de simulation des circuits logiques 110

Annexe 2 : Programme de description des masques du réseau de cellules 132

Annexe 3 : Commande séquentielle de l'échangeur de chaleur pilote du Laboratoire d'Automatique 138

Annexe 4 : Commande séquentielle de la colonne à distiller pilote du Laboratoire d'Automatique 150

Bibliographie 185

I N T R O D U C T I O N

Avec l'automatisation toujours croissante des systèmes industriels (commande de chaines de montage ou de postes de travail, démarrage, contrôle et arrêt automatiques de processus), l'étude des automates asynchrones (c'est-à-dire tels que leurs grandeurs d'entrée soient définies à tout instant par leur niveau 0 ou 1) garde toujours une grande importance.

Jusqu'à maintenant, leur synthèse est effectuée souvent à partir du tableau d'états avec la minimisation du nombre de variables internes comme critère d'optimalisation pour le réseau cablé correspondant. Certaines de ces méthodes ont été programmées sur gros calculateur [12].

Depuis quelques temps, de nouvelles possibilités et demandes sont venues, d'un côté, l'apparition des circuits intégrés à grande échelle de plus en plus performants, et de l'autre, le traitement d'automates très importants.

Pour ces deux raisons, de nombreuses études ont été entreprises dans différentes voies en vue d'élaborer des réseaux du type cellulaire. Tout d'abord GRASSELLI [5] et MANGE [8] gardent la partie combinatoire la plus importante possible pour la mettre sous la forme d'un réseau cellulaire. ARNOLD et NEWBORN [1] décomposent le système en registres à décalage associés à un réseau combinatoire qui lui, élabore les sorties et les variables internes. La méthode proposée par BRZOZOWSKI et SINGH [2] consiste à disposer en série des cellules séquentielles identiques pour construire les automates asynchrones à mémoire finie. Ces méthodes ont toujours des limitations, soit au niveau de la structure des automates,

soit au niveau de leur complexité et la partie combinatoire garde toujours une dimension non négligeable. Une approche cellulaire différente est celle de R. DAVID [3, 4] pour laquelle le réseau de Cellules Universelles pour Séquences Asynchrones (CUSA) a une structure associée directement à celle du tableau d'états de l'automate qu'il représente, sa partie combinatoire étant minimum. Avec cette méthode, le temps d'étude est considérablement diminué et le réseau câblé fonctionne avec sûreté sans aléa.

Pour ces raisons, une réalisation intégrée à grande échelle en technologie métal-oxyde-semiconducteur du réseau de CUSA a été envisagée en collaboration étroite avec le Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique du Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE.

D'un autre côté, au fur et à mesure des exemples théoriques et réels que nous avons étudiés (ceux-ci étant principalement du type industriel, c'est-à-dire comportant un grand nombre d'entrées et un grand nombre de sorties), nous avons été amenés à mettre au point une méthode de synthèse utilisant les CUSA qui donne rapidement le réseau câblé à partir des données contenues dans le cahier des charges. Pour celà, nous construisons un graphe des transitions qui, déduit directement du cahier des charges, visualise facilement les séquences logiques de l'automate, permet simplement des modifications importantes ou non de ces mêmes séquences et conduit automatiquement au réseau de CUSA fonctionnant sans aucun aléa.

Le présent travail comporte cinq chapitres principaux qui sont les suivants :

Le premier chapitre est consacré à une vue d'ensemble rapide de la méthode de synthèse des systèmes séquentiels asynchrones définis par leur tableau d'états primitif au moyen de CUSA.

Après avoir donné les caractéristiques logiques et technologiques de la cellule universelle, nous présentons la méthode de cablage du réseau canonique, puis les méthodes de simplifications permettant de diminuer avec un facteur parfois important le nombre de cellules et celui des connexions ; l'ensemble démontrant tout l'intérêt de cette méthode de synthèse systématique et simple.

Les étapes successives sont les suivantes :

. établissement du tableau d'états primitif à partir du cahier des charges,
. recherche des états sources,
. recherche des groupements d'états,
. tracé du réseau cablé.

Cette méthode de synthèse qui associe une cellule à chaque état stable et une connexion à chaque transition permet de traiter un système de complexité quelconque. Néanmoins quand l'automate comporte un grand nombre d'entrées et relativement peu de transitions, la représentation au moyen d'un tableau d'états primitif s'avère complexe; c'est pourquoi nous nous sommes orientés vers une représentation au moyen d'un graphe des transitions.

Le chapitre 2 est ainsi consacré à la méthode d'élaboration d'un graphe fonctionnel pour lequel chaque noeud peut être associé directement à une cellule et chaque branche à une connexion sans aucun problème.

A cette recherche de graphe fonctionnel sont associées des méthodes de simplification, non indispensables pour obtenir un fonctionnement correct du réseau câblé, qui sont voisines des recherches des groupements et des états-sources dans les tableaux d'états primitifs.

Après cette étude théorique, on aborde la partie technologique dans les trois chapitres suivants.

Le chapitre 3 contient des idées générales sur la technologie M.O.S. et quelques caractéristiques particulières de cette même technologie qui nous sont indispensables pour la suite de l'étude, principalement les caractéristiques dynamiques et l'étude des temps de propagation des signaux à travers une porte.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude de la cellule universelle en vue de lui assurer un fonctionnement correct dans tous les cas possibles envisagés et de ses caractéristiques dans la perspective d'une inclusion avec ses circuits annexes dans un réseau complexe intégré à grande échelle. Dans l'une des parties de ce quatrième chapitre, nous décrivons les caractéristiques et les performances d'un programme qui a été mis au point pour simuler le fonctionnement d'une cellule en vue de la détermination précise de toutes ses caractéristiques.

Dans le chapitre 5, nous décrivons le réseau d'une complexité maximum de 700 transistors qui est implanté sur la pastille de silicium. Sa structure est figée mais étudiée pour recevoir facilement des automates de types variés, leurs entrées et leurs sorties étant simplement les entrées et les sorties du boitier dans lequel est enfermée la puce de silicium, seuls accès disponibles mis à part les fils d'alimentation.

Finalement, le premier circuit cablé est décrit. Il est particulier par le fait qu'il contient à lui seul trois automates de différents types.

Une dernière partie comporte une série d'annexes rapportant les programmes utilisés et des applications de la méthode proposée dans la première partie pour la commande de deux processus du Laboratoire d'Automatique.

P A R T I E 1

SYNTIESE CELLULAIRE

DES AUTOMATES ASYNCHRONES

DEFINIS PAR LEURS GRAPHES

1. RAPPELS SUR LA SYNTIESE CELLULAIRE DES AUTOMATES PAR LA METHODE DE DAVID. [3 - 4]

Ce premier chapitre est une suite de rappels mettant en relief, d'une part, le principe de fonctionnement de la Cellule Universelle pour Séquences Asynchrones ou CUSA, d'autre part, les méthodes de simplification du tableau d'états qui seront reprises plus tard en vue du traitement à partir des graphes.

Nous donnons pour commencer quelques notations qui seront utilisées :

e_i : variable d'entrée ou entrée primaire

$E_i=\{e_k\}$: état d'entrée ou colonne

s_i : sortie

$S_i=\{s_l\}$: état de sortie

a, b ... : état du système

A, B ... : CUSA représentative des états a, b ...

y_a, y_b .. : sorties correspondantes des cellules A, B ...

a_n : état quelconque

a^i_{n-1} : un de ses états ascendants

a^j_{n+1} : un de ses états descendants

Nous faisons l'hypothèse classique qu'une seule variable d'entrée change à la fois, hypothèse qui ne sera d'ailleurs pas toujours nécessaire.

Les tableaux d'états considérés sont des tableaux primitifs, c'est-à-dire que chaque état est à la fois un état

interne associé à une ligne et un état total correspondant à une ligne et une colonne.

1.1. Principe de fonctionnement. Conditions logiques

La figure 1.1 représente une partie du graphe des transitions d'un système séquentiel. Chaque lettre entourée d'un cercle est un état stable et chaque branche un état instable ou transition d'un état stable vers un autre état stable. A côté de chaque branche, nous notons la variable d'entrée dont la variation de 0 à 1 produit la transition correspondante.

L'état a_n peut être atteint à partir d'un des états ascendants a^i_{n-1} sous l'influence de la variation de l'entrée e_i correspondante. De même, l'état a_n peut conduire à un des états descendants a^j_{n+1} sous l'influence de la variation de l'entrée e'_j.

Les conditions à remplir pour la sortie y_n de la cellule A_n associée à l'état a_n qui doit prendre la valeur 1 quand et seulement quand le système est dans l'état a_n, sont les suivantes :

- y_n prend la valeur 1 (état b_1 de la figure 1.2) si on a les deux conditions suivantes satisfaites :

  le système séquentiel se trouve dans un des états ascendants a^i_{n-1} (état b_o) ce qui s'exprime par la condition logique :

$$C_1 = \sum_i y^i_{n-1} = 1$$

  la variable d'entrée e_i prend la valeur 1 (c'était la seule entrée nulle pour a^i_{n-1}), ce qui se traduit logiquement par :

$$C_2 = \prod_i e_i = 1$$

- y_n peut redevenir nul (état a_o) si l'une des variables d'entrée devient nulle, c'est-à-dire si le système passe dans l'un des états descendants a^j_{n+1}, ce qui peut s'exprimer par l'une des deux relations :

$$C_{3\alpha} = \left(\prod_j e_j\right)' = 1$$

$$C_{3\beta} = \sum_j y^j_{n+1} = 1$$

Ces deux conditions étant équivalentes, la remise à zéro peut aussi se faire par l'une ou l'autre ou par l'une et l'autre.

Finalement, le fonctionnement complet de la cellule se trouve résumé dans le graphe de la figure 1.2.

Soit K l'ensemble des indices k ; il inclut l'ensemble des indices i et celui des indices j. Mais il a été montré facilement que $\prod e_i$ et $\prod e_j$ se comportent comme $\prod e_k$ si bien que nous pouvons écrire :

$$C_2 = C'_{3\alpha} = \prod_{k\in K} e_k$$

Comme il a été montré qu'il n'existe aucune solution logique supprimant tous les aléas de façon rigoureuse, nous avons été conduits à choisir parmi les relations C_3 celle qui donne la réalisation la plus simple. $C_{3\alpha}$ a été retenue pour la raison principale qu'elle nécessite le minimum de connexions (point essentiel dans la perspective d'une intégration à grande échelle).

Pour cette solution, les conditions de fonctionnement sont données par les deux relations :

$$C_1 = \sum_{i \in I} y^i_{n-1}$$

$$C_2 = C'_{3\alpha} = \prod_{k \in K} e_k$$

et le fonctionnement de la cellule est représenté par le tableau d'états réduit de la figure 1.3 traduisant le graphe général de la figure 1.2.

L'équation logique de y_n est alors :

$$y_n = \left(\sum_{i \in I} y^i_{n-1} + y_n \right) \prod_{k \in K} e_k$$

Avec des opérateurs NI, opérateurs naturels en technologie M.O.S. la cellule a l'allure de la figure 1.4, son schéma symbolique étant celui de la figure 1.5.

Le retard λ présent à sa sortie permet de supprimer tous les aléas de fonctionnement du système. Nous allons voir dans le paragraphe suivant quelles sont ses caractéristiques.

1.2. Aléas de fonctionnement. Conditions technologiques.

Supposons que le système se trouve dans un état a^i_{n-1} ascendant de a_n et étudions ce qui peut se passer quand nous commutons de l'un vers l'autre.

En se référant au tableau d'états correspondant, la colonne contenant a^i_{n-1} n'est différenciée de celle contenant a_n que par la variable d'entrée e_i et il en est de même pour les états a^i_{n+1} et a_n si bien que a^i_{n-1} et a^i_{n+1} se trouvent dans la même colonne (la conditon C_2 est remplie pour a^i_{n+1} quand le système est dans l'état a^i_{n-1}).

Dans la transition considérée, toutes les entrées primaires sont unitaires sauf e_i si bien que tout se passe comme si a_n n'avait qu'un ascendant et qu'un descendant : toutes les cellules autres que A^i_{n-1}, A_n et A^i_{n+1} restent ainsi dans leur état de repos de telle sorte que le problème des aléas est résolu pour n'importe quel réseau quand il l'a été pour ces trois cellules.

Les aléas sont de trois types :

- l'aléa d'entrée : si y^i_{n-1} revient trop tôt à 0, y_n n'a pas le temps de prendre son niveau 1 et le système perd l'état dans lequel il devrait se trouver.
- l'aléa de sortie : y^i_{n+1} prend momentanément le niveau 1 si le front montée de y_n est trop rapide.
- l'aléa de continuité : une sortie s_k du système qui vaut 1 pour les états a^i_{n-1} et a_n doit rester à 1 pendant la transition de a^i_{n-1} vers a_n.

Ces trois aléas sont supprimés si nous satisfaisons respectivement chacune des trois inéquations :

$$\lambda_d > X$$

$$\lambda_m > Y$$

$$\lambda_d + \lambda_m > Z$$

λ_d et λ_m sont les valeurs respectives de λ pour la montée et la descente du signal. Nous les étudions plus loin pour le cas précis de la CUSA en technologie M.O.S.

1.3. Méthodes de cablage

Prenons comme exemple, une porte avec mémoire, petit système à deux entrées e_1 et e_2 et une sortie s, dont le fonctionnement peut être défini ainsi :

quand $e_1 = 1$ alors $s = e_2$

quand $e_1 = 0$, s conserve sa valeur.

Ce fonctionnement est représenté soit par le tableau d'états primitif de la figure 1.6.1, soit par le graphe primitif correspondant de la figure 1.6.2.

A partir de l'une de ces deux représentations équivalentes, le cablage canonique de la figure 1.7 est obtenu en appliquant les règles suivantes :

1.3.1. Règles de cablage d'un système défini par son tableau d'états.

. A chaque état stable, on associe une CUSA sur laquelle on cable :

les entrées primaires associées à la colonne de l'état correspondant (0 pour e_i, 1 pour e'_i)

les entrées secondaires correspondant aux sorties des cellules ascendantes dans la séquence.

. Chaque sortie du système est réalisée par un opérateur OU associant les sorties de CUSA correspondant à des états où la sortie considérée vaut 1.

1.3.2. Règles de cablage d'un système défini par son graphe.

. A chaque noeud, on associe une CUSA sur laquelle on cable comme entrées primaires : les compléments des variables

d'entrée qui font arriver à cet état et les variables d'entrée qui en font partir.

les entrées secondaires correspondant aux sorties des cellules ascendantes dans la séquence.

. Chaque sortie est réalisée par un opérateur OU (chaque état de sortie étant écrit sur le graphe à côté du noeud correspondant).

1.4. Méthode de simplification en partant du tableau d'états

Après avoir rappelé le fonctionnement de la cellule, nous allons voir maintenant deux types de simplification permettant de diminuer le réseau cablé sans toutefois que la sortie du système ne soit affectée ni que le fonctionnement de la séquence ne soit perturbé.

Nous en resterons simplement aux définitions et à l'énoncé des principaux résultats, le strict nécessaire permettant néanmoins d'étudier au chapitre suivant la synthèse des systèmes séquentiels définis par leurs graphes.

1.4.1. Suppression de connexions et d'états par les états sources.

Il a été montré [3] qu'une réalisation cellulaire équivalente est obtenue pour certains états en remplaçant toutes les entrées secondaires par un niveau 1 permanent. La notion d'hypovalence permet de déterminer ces états sources d'une façon très générale.

Un cas particulier, important dans le cadre des automates industriels, est le suivant : un état stable seul dans sa colonne est un état source.

Dans l'exemple précédent, c et d sont des états sources. Après avoir supprimé toutes les branches qui arrivent à ces deux états, le graphe devient celui de la figure 1.8.

Donnons maintenant la définition de l'état à sortie non nulle. Un état S.N.N. est un état pour lequel une au moins des sorties est égale à 1, si bien qu'il doit lui être associé une CUSA, obligatoirement, pour l'élaboration de cette sortie.

Par contre, un état à sortie nulle n'est pas indispensable, sauf s'il se trouve inclus dans une chaine entre des états S.N.N.

Le graphe de la figure 1.8 est divisé en deux parties et l'une d'elles seulement est nécessaire (états c, e et f). Nous obtenons alors le réseau cablé de la figure 1.9.

1.4.2. Groupement d'états.

Des états présentant des fonctions semblables peuvent être groupés en un même état.

Une condition suffisante pour que deux états simples ou multiples a et b soient représentés par une même cellule est :

(1) ils produisent des sorties compatibles
(2) ils ne sont différenciés que par une entrée e_i
(3) leurs descendants sont compatibles
(4) l'ascendant de l'un ne peut être que l'autre dans une variation de e_i (ou cet ascendant n'existe pas).

L'ensemble des ascendants de ab est alors l'union de l'ensemble des ascendants de a excepté b et de l'ensemble des ascendants de b excepté a, et il en est de même pour les descendants.

L'état ab se comporte comme un état insensible à l'entrée e_i. Des états multiples groupables doivent être insensibles aux mêmes variables d'entrée.

Dans le cas de la porte à mémoire, les états e et f satisfont ces conditions. Nous arrivons finalement au réseau de la figure 1.10 ne comportant que deux CUSA et une porte OU à deux entrées (le réseau canonique comportait six CUSA et une porte OU à trois entrées).

1.4.3. Application à un automate industriel.

Nous venons de voir comment la méthode de simplification est appliquée à un tableau d'états complètement spécifié.

Nous allons considérer maintenant le cas d'un automate du type industriel caractérisé par un très grand nombre d'entrées et un tableau d'états très incomplètement spécifié.

L'exemple que nous allons traiter reste encore dans le domaine des petits automates puisqu'il ne comporte que cinq entrées et deux sorties. Le problème consiste à transporter des paquets d'un tapis roulant A vers un tapis roulant B par l'intermédiaire d'un plateau sur lequel sont momentanément posés les paquets. Ce plateau se déplace à l'aide de deux vérins hydrauliques V1 et V2, le premier vertical, le second horizontal.

Les entrées sont :

P : présence d'un paquet sur le tapis A
H : plateau en position haute
B : plateau en position basse
D : plateau à droite
G : plateau à gauche

Le tableau d'états correspondant est celui de la figure 1.11. Il comprend 32 colonnes ; certaines sont obligatoirement vides du fait du fonctionnement physique du système (le plateau ne peut pas être à la fois en haut et en bas ou à droite et à gauche), les autres sont très peu remplies. L'état a correspond à l'état initial où les entrées sont : P - H' - B - D - G' .

Le cablage canonique comporterait 17 CUSA, mais on a de nombreuses simplifications.

A part les états b et k, tous les autres sont seuls dans leur colonne, ce qui veut dire que presque tous les états sont sources. Mais chaque état n'ayant que deux ascendants, il n'est guère utile de remplacer les entrées secondaires des cellules correspondantes par un niveau 1 permanent.

Par contre, de nombreux groupements sont possibles : ac, bd, eflm , ghno, ijpq et k. Parmi ces six états multiples, nous ne gardons que les quatre premiers qui contribuent à l'élaboration de deux sorties V1 et V2, ac étant l'état source de la séquence effectue une mise en condition initiale automatique.

Finalement, le réseau comporte quatre CUSA, un OU à deux entrées et un autre à trois entrées. C'est celui donné sur la figure 1.12.

La synthèse des automates industriels s'effectue donc très facilement, mais sa mise en oeuvre devient très vite pénible à cause des tableaux d'états qui prennent rapidement des tailles considérables (même pour un traitement automatique par calculateur, la place occupée en mémoire devient vite prohibitive) ; c'est pourquoi nous nous sommes orientés vers un outil mieux adapté pour ces problèmes : le graphe.

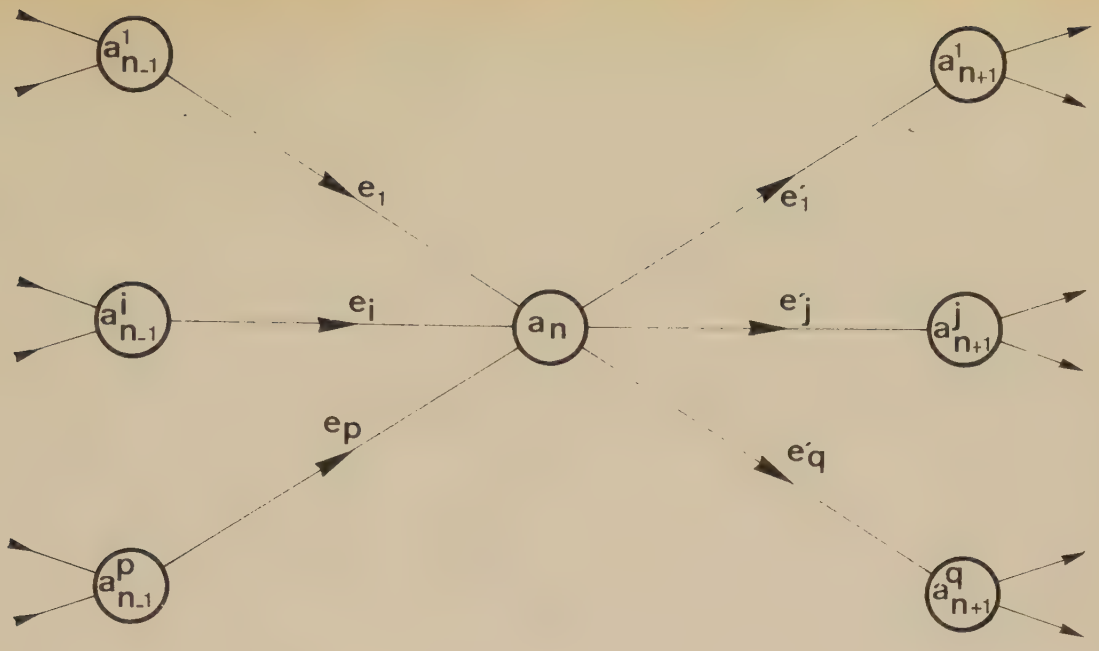


Fig 1.1. Graphe de transitions

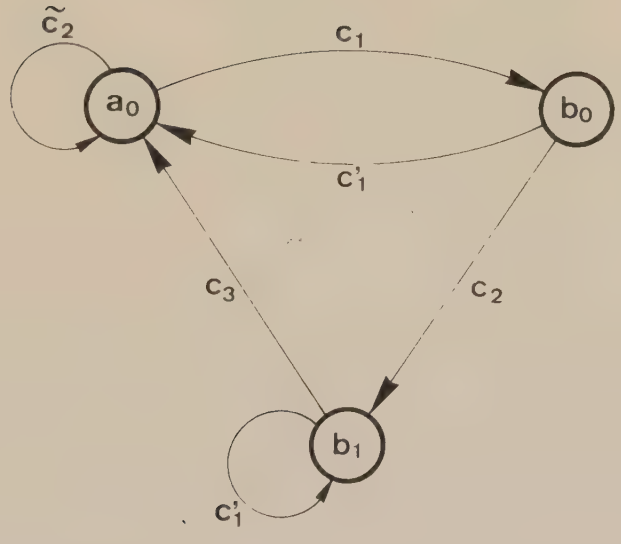


Fig 1.2. CUSA, Graphe de fonctionnement

c_1c_2	00	01	11	10	y_n
	①	②	4	③	0
	1	⑤	④	—	1

Fig 1.3. CUSA, Tableau d'etats

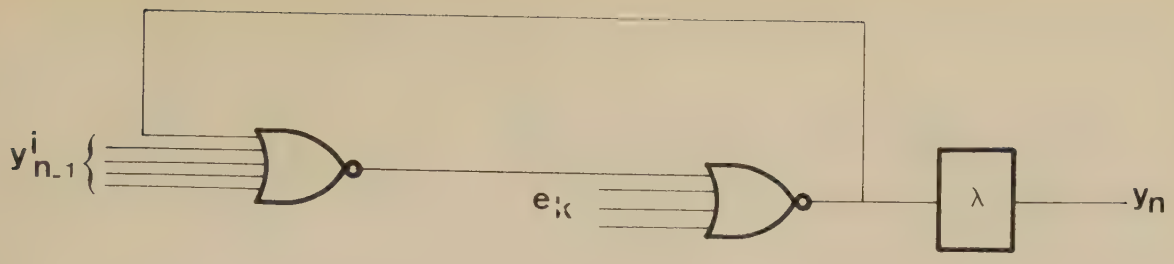


Fig 1.4. CUSA , Schéma logique

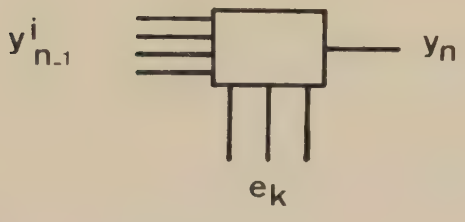


Fig 1.5. CUSA , Représentation symbolique

$e_1 e_2$	00	01	11	10	S
	(a)	b	—	d	0
	a	(b)	c	—	0
	—	e	(c)	d	1
	a	—	c	(d)	0
	f	(e)	c	—	1
	(f)	e	—	d	1

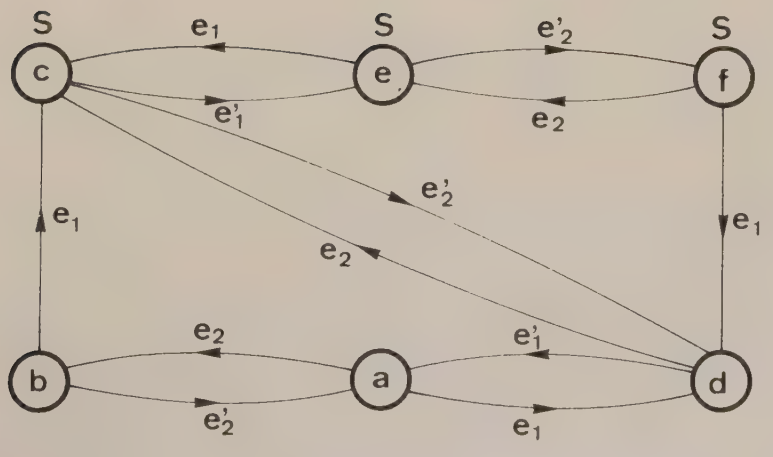


Fig 1.6 . Porte avec mémoire

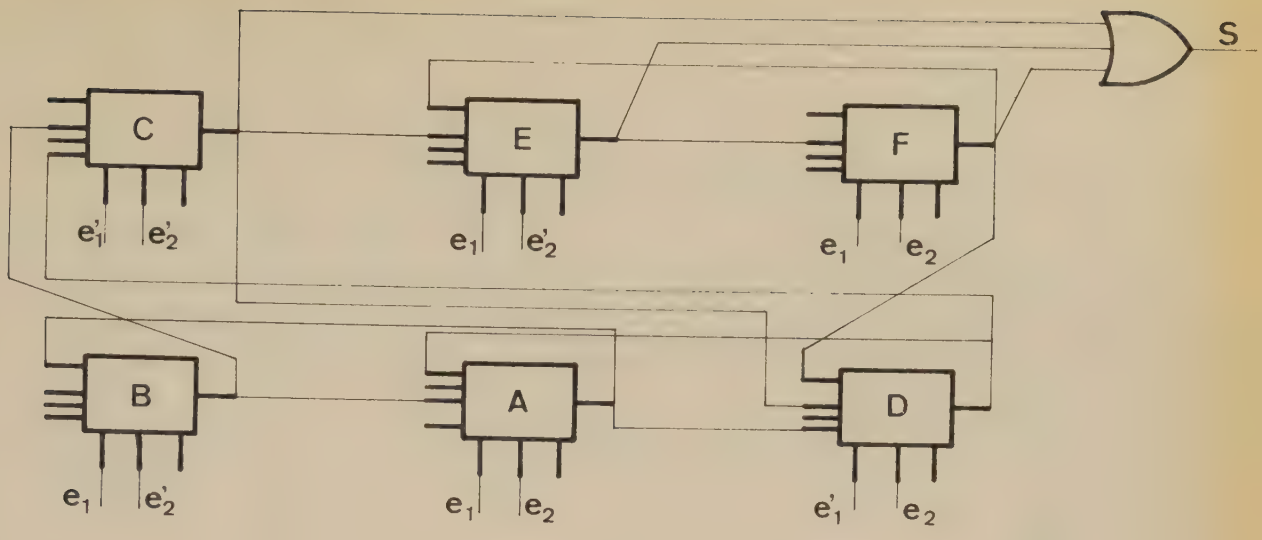


Fig 1.7. Cablage canonique

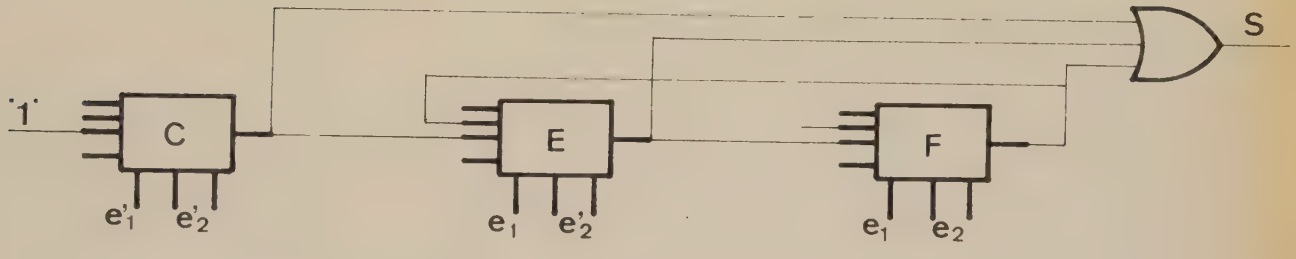


Fig 1.9. Cablage intermédiaire

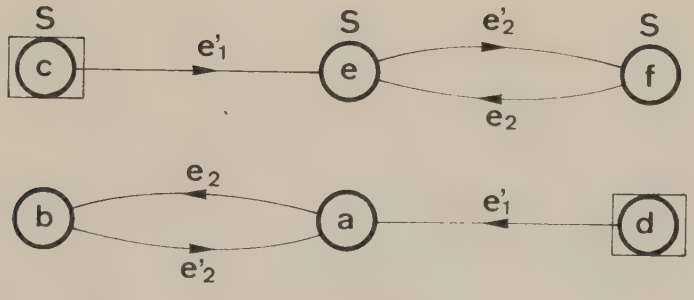


Fig 1.8. Graphe réduit

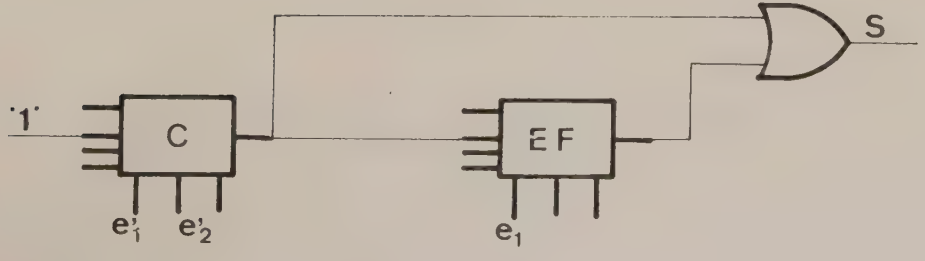


Fig 1.10. Cablage final

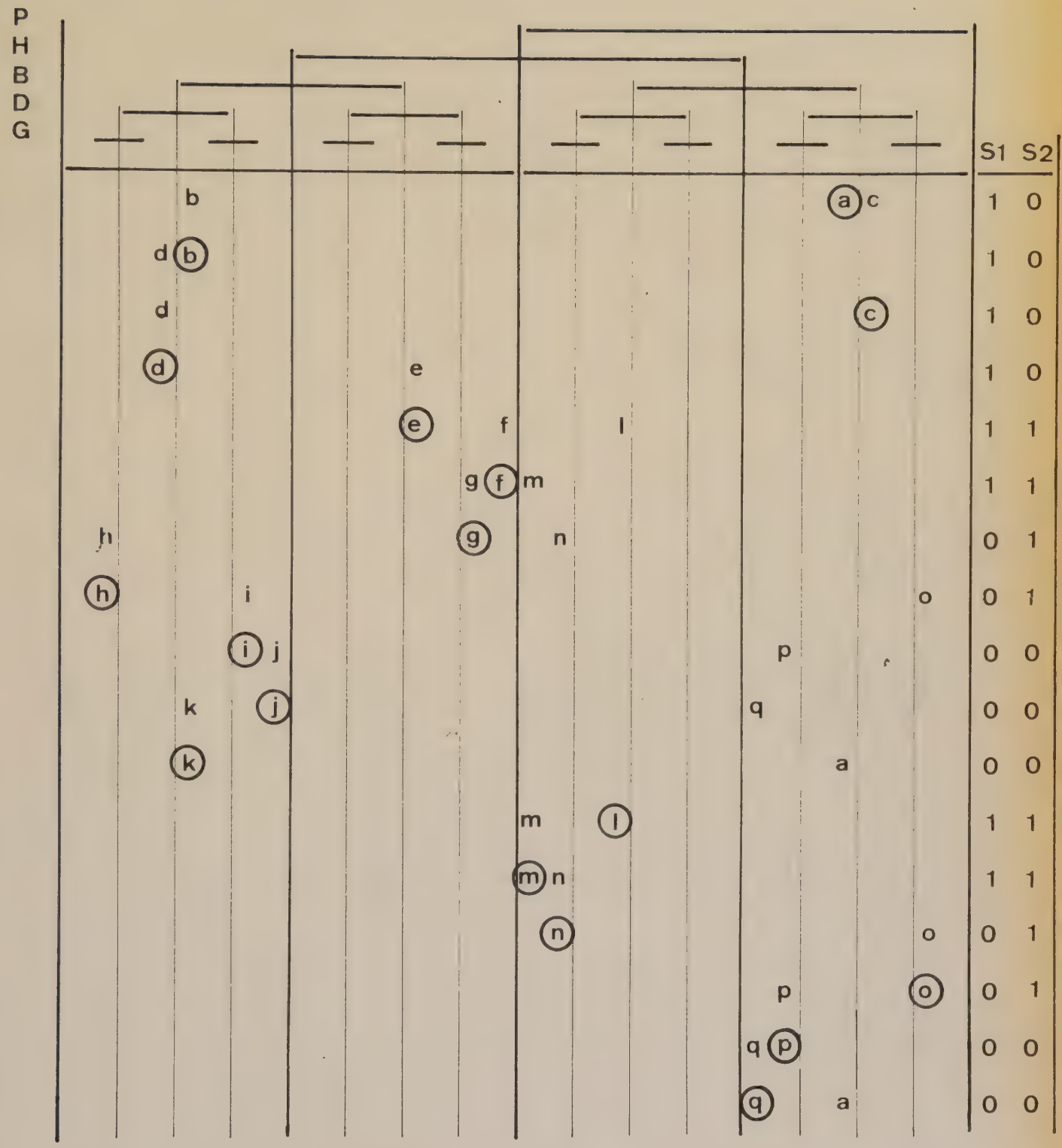


Figure 1.11. tableau d'états primitif

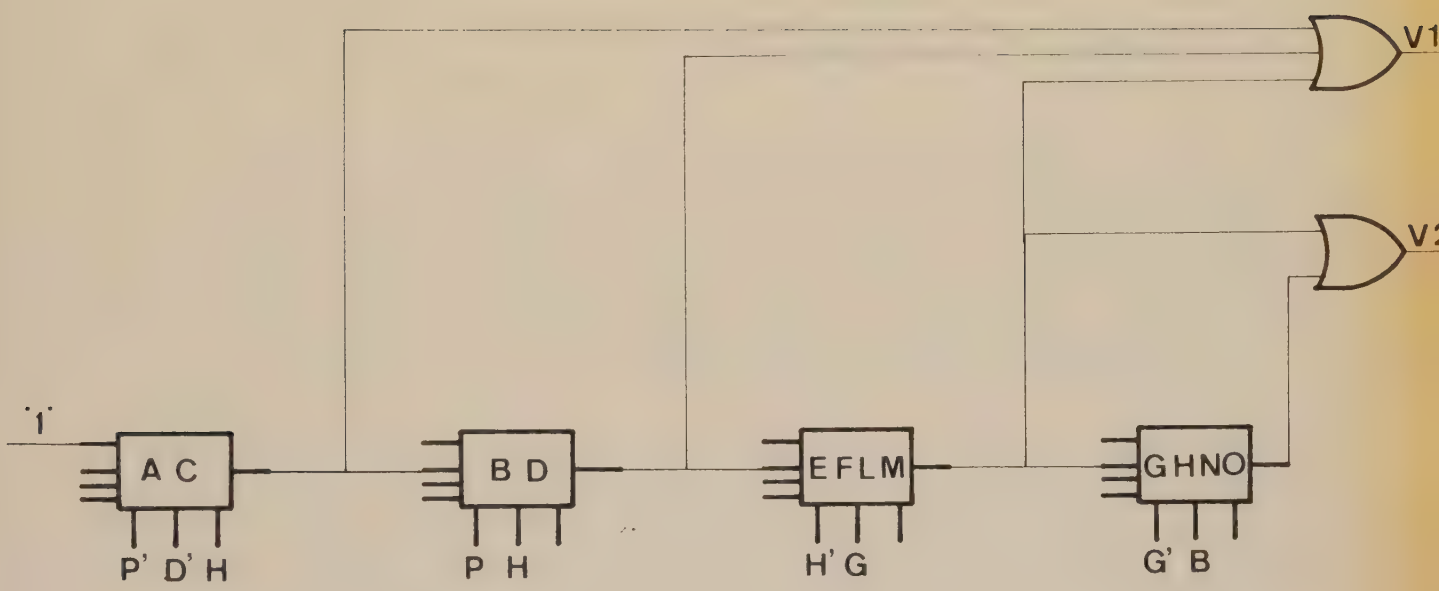


Fig 1 .12. Réseau cablé

2. SYNTHESE CELLULAIRE DES AUTOMATES DEFINIS PAR LEURS GRAPHES

A la fin du précédent chapitre, nous avons donné un exemple de petit automate industriel. Le réseau simplifié de CUSA a été obtenu très rapidement par traitement simple du tableau d'états primitif, mais nous n'avons pas considéré l'établissement de ce tableau qui devient très complexe pour deux raisons principales :

- Le nombre d'entrées : aux cinq entrées correspondent 32 colonnes qui ne sont pas toutes utilisées : le tableau est presque vide et difficile à lire. Pour quinze entrées nous n'aurions à considérer que quelques centaines de colonnes au maximum parmi les 32 768 possibles (voir exemples en annexes 3 et 4).
- Le cahier des charges initial est généralement plus ou moins incomplet et ne permet pas d'établir immédiatement ce tableau d'états primitif qui subira d'ailleurs ensuite de très grandes simplifications et réductions.

Par contre, il devient très simple de transformer le cahier des charges, même élémentaire, en graphe ou organigramme. En appliquant certaines règles, nous apporterons dans une première étape toutes les modifications nécessaires à ce graphe pour qu'il devienne fonctionnel et soit l'image exacte du réseau de CUSA correspondant. Une seconde étape non indispensable permettra de simplifier ce graphe fonctionnel.

2.1. Définitions

Reprenons l'exemple précédent. Un premier cahier des charges peut être celui de la figure 2.1 dans lequel nous ne donnons que les actions caractérisant le fonctionnement de l'automate sous la forme d'une succession d'expressions comportant ici les trois termes suivants : DES QUE, SI, SINON.

Avec ce cahier des charges, nous pouvons commencer à tracer un graphe, le graphe initial de la figure 2.2, qui s'établit comme suit :

. Un noeud est associé à chaque action élémentaire et une branche à chaque transition. Ex. la transition vers le noeud α et le noeud α sont associés à la phrase : DES QUE un paquet arrive sur le tapis A, le plateau monte sous l'action du vérin V1.

. L'action correspondant à chaque phrase est notée au-dessus du noeud associé. Ex : au noeud α est associée l'action V1

. La variable d'entrée qui, passant de 0 à 1, permet la commutation d'un état vers un autre, est notée sur la branche reliant les noeuds correspondants. Ex. : entre α et β, c'est la variable H qui commute puisque le plateau arrive à sa position supérieure.

. En présence d'un aiguillage SI-SINON, il faut ajouter entre parenthèses la variable qui conditionne la commutation après la variable qui réalise vraiment cette commutation afin d'avoir un graphe facile à lire. Ex. : DES QUE le chariot arrive à droite, on commence un nouveau cycle SI un paquet est sur le tapis A, SINON on attend qu'il arrive

A partir de cette formalisation très simple, nous pouvons alors entrer davantage dans les détails du fonctionnement de l'automate et plus particulièrement considérer le comportement des variables non encore identifiées pour chaque noeud.

Aussi, le cahier des charges peut-il se présenter sous la forme plus complète suivante :

(α) DES QUE un paquet est arrivé, le plateau monte verticalement.

(α') IMMEDIATEMENT APRES P et B reviennent à 0 dans un ordre quelconque sans modifier l'action.

(ß) DES QUE le plateau se trouve en position haute, il se déplace horizontalement de la droite vers la gauche. A PARTIR DE CET ETAT INCLUSIVEMENT, un nouveau paquet peut arriver sur le tapis A.

(ß') IMMEDIATEMENT APRES avoir commencé la translation horizontale, le contact fin de course à droite revient à 0.

.....

Ce cahier des charges complet contient deux nouveaux termes par rapport au précédent (appelés ici IMMEDIATEMENT APRES et POUR CET ETAT), ce qui fait apparaître deux groupes de variables :

. Une entrée qui commute une fois à l'intérieur d'un état est associée au terme IMMEDIATEMENT APRES.

. Une entrée qui peut commuter un nombre quelconque de fois (y compris zéro) est associée à : A PARTIR DE CET ETAT INCLUSIVEMENT.

. Les variables d'entrée, autres que celles qui viennent d'être définies, sont les variables qui ne commutent pas.

Avec tous ces renseignements, nous pourrions alors tracer le graphe primitif de la figure 2.3 transposition exacte du tableau d'états primitif de la figure 1.11. Nous allons voir qu'il est inutile de le construire et qu'il suffit d'élaborer un graphe fonctionnel répondant à certaines conditions.

Donnons auparavant quelques notations supplémentaires à celles du premier chapitre en nous référant à l'état j de la figure 2.4 correspondant à un noeud de graphe.

$\sigma_j = \{S_1, S_2\}$: ensemble des sorties activées dans cet état

$\alpha_j^a = \{e_2\}$: ensemble des variables d'entrée faisant arriver dans j

$\alpha_j^c = \{e_5\}$: ensemble des variables d'entrée conditionnant l'arrivée dans j.

$\alpha_j = \alpha_j^a \cup \alpha_j^c = \{e_2, e_5\}$: ensemble des variables d'entrée nécessaires pour arriver dans j.

$\delta_j = \{e_1, e_6\}$: ensemble des variables faisant partir de j. Il est évident que cet ensemble doit être compatible avec α_j, c'est-à-dire qu'une variable se trouvant dans l'un des deux doit se trouver (si elle y est) avec la valeur complémentée dans l'autre; dans le cas contraire, le graphe serait mal construit.

$\phi_j = \{e_3, e_4\}$: ensemble des variables indéterminées pour j.

on a :

$$\alpha_j \cup \delta_j \cup \phi_j \subseteq E_j$$

$\complement_E(\alpha_j \cup \delta_j \cup \phi_j)$ constitue un ensemble de variables d'entrée déterminées mais auxquelles l'état j est insensible et il complète ainsi ϕ_j.

Les automates que nous construisons dans cette étude sont tous des automates déterministes : chaque état n'active qu'un de ses descendants à la fois. Pour celà, en appelant $\Delta_j^{\pi}, e_1 = \{e_1e_3, e_1e'_3\}$1 ensemble des monomes δ_j^{π}, e_1 caractérisant chaque transition descendante de j associée à la variable e_1, il nous faudra satisfaire la condition suivante pour avoir un graphe déterministe :

Les produits des δ_j^{π}, e_i pris deux à deux doivent être nuls pour chaque variable d'entrée e_i. Ici, seule la variable e_1 est à considérer avec deux monones δ_j^{π}, e_1

$(e_1e_3)(e_1e'_3) = 0 \Longrightarrow$ notre graphe est déterministe

Dans le cas où l'on aurait oublié e_3, k et l auraient été activés simultanément par la commutation de e_1.

Pour cette raison, α_j^c appartient à l'ensemble des variables activantes de l'état j au même titre que α_j^a et δ_j.

Ainsi. le graphe est fonctionnel si pour chaque état j :

(I) : une variable de α_j^a apparaît toujours avec le même signe ; une variable de δ_j apparaît toujours avec le même signe mais opposé au premier.

(II) : les variables activantes de $\alpha_j \cup \delta_j$ sont différentes de celles de ϕ_j.

(III) : si une variable apparaît plusieurs fois dans δ_j, aucun des états atteints par cette variation ne doit être insensible à une variable qui est indéterminée pour j.

Nous allons montrer que les conditions de groupement (1) (2) (3) et (4) du paragraphe 1.4 sont satisfaites si chaque état j satisfait les conditions (I) (II) et (III).

Condition (1) : A chaque noeud du graphe ne peut être associé qu'un état de sortie ; par conséquent, cette première condition est automatiquement satisfaite.

Condition (2) : La condition (I) est équivalente à la condition (2) appliquée à des groupements successifs. j correspond à 2^n états simples réels ou fictifs, n étant le nombre de variables appartenant à ϕ_j. L'ensemble de ces 2^n états correspond à un n-cube. C'est la condition nécessaire et suffisante pour que l'état soit atteignable c'est-à-dire que $Ne_i\ Ne_j$ paragraphe 1.1 ne soit pas toujours nul.

Condition (3) : cette condition exprime que le système étant dans l'état j, une variation d'entrée ne doit pas conduire dans plusieurs états différents. Elle est satisfaite par la condition (III).

Condition (4) : elle est satisfaite grâce à la condition (II) qui interdit à une même variable d'appartenir à la fois à ϕ_j et α_j.

Reprenons comme exemple l'automate de transport des paquets. L'état α est atteint par la commutation de P mais cette même variable P commute à nouveau dans α si bien que la CUSA associée à α retomberait rapidement au niveau 0 rendant impossible la poursuite de la séquence. Il est donc nécessaire d'effectuer un dédoublement d'états.

Dans le cas où le graphe est fonctionnel, le cablage est obtenu de la façon suivante (la figure 2.5 représente le cablage correspondant à la partie de graphe de la figure 2.6):

. Une CUSA J est associée à chaque noeud j du graphe, ses entrées secondaires étant les sorties des CUSA ascendantes et ses entrées primaires, les variables de l'ensemble δ_j ajoutées au complément des variables de l'ensemble α_j (dans

le cas d'une technologie à base de portes NI)

- A chaque sortie de l'automate, un circuit OU rassemble les sorties des CUSA correspondant aux états où cette sortie du système est unitaire.

2.2. Obtention du graphe fonctionnel : dédoublement d'états

Pour que le graphe soit fonctionnel, il faut avoir :

$$(\alpha_j \cup \delta_j) \cap \phi_j = \emptyset$$

Cette condition, n'étant pas remplie en général, pose un problème de fusion d'états en fonction de certains critères.

2.2.1. Dédoublement simple d'un état

C'est le cas où l'une des variables de ϕ_j appartient à α_j ou δ_j. Prenons par exemple le cas de la figure 2.6.

L'état q peut être un état multiple regroupant toutes les transitions possibles sauf celles de e_i et e_j qui précédemment y font arriver et en font sortir. Si cette transition e_i peut se produire, il est nécessaire d'associer un état q_1 à la valeur e_i et un état q_2 à la valeur e'_i. Ainsi, e_i fait passer de p à q et e_j de q_1 ou q_2 à r, ce qui correspond au graphe de la figure 2.7.1 associé au tableau d'états de la figure 2.7.2.

Sur ce tableau d'états, il est bien visible que les conditions de groupement ne sont pas toutes respectées pour q_1 et q_2 (un des ascendants de q_1 est p dans la transition de e_i et non q_2).

La condition de dédoublement d' un état j s'exprime alors ainsi quand une de ses entrées e_i appartenant à ϕ_j fait

arriver en j : les deux nouveaux états q_1 et q_2 reliés entre eux par la commutation de e_i reçoivent chacun tous les ascendants de q, sauf pour q_2 ceux qui sont déterminés par rapport à e_i ; q_1 et q_2 conduisent ensuite tous les deux à chaque descendant de q.

Dans le cas où $e_i \in \phi_j$ est une variable faisant partir de j le dédoublement est semblable quand e_i est le seul élément de ϕ_j ; il demande ensuite une révision du cahier des charges mais cette situation difficile se rencontre presque jamais.

Un cas particulier intéressant est celui où la variable qui conduit le système dans un état reprend sa valeur initiale IMMEDIATEMENT APRES avoir mis le système dans cet état. Des connexions, traduisant des commutations qui ne se produiront jamais, peuvent alors être supprimées si bien que le graphe initial de la figure 2.6 ne contenant pas l'état σ devient le graphe fonctionnel de la figure 2.8.

2.2.2. Dédoublement multiple d'un état

Le dédoublement d'un état j est le plus souvent un dédoublement simple. Il se peut néanmoins que plusieurs variables appartenant à ϕ_j soient des variables de α_j ou δ_j ou $\alpha_j \cup \delta_j$

Nous allons traiter comme exemple le cas particulier où e_i et e_j, deux variables de ϕ_q sont des variables de α_q pour l'état q. (graphe initial de la figure 2.9). Le dédoublement s'effectue en deux étapes :

- d'abord q_1 et q_2 sont séparés par la variable e_i (figure 2.10)
- ensuite, les conditions (I) (II) et (III) étant satisfaites pour q_2 mais non pour q_1, q_1 est dissocié en q_1 et q_3

(figure 2.11.1) en appliquant la méthode énoncée au paragraphe 2.2.1.

Il aurait été possible de séparer q_1 et q_2 par la variable e_j ; le graphe fonctionnel résultant aurait alors été celui de la figure 2.11.2. Au paragraphe suivant, nous montrerons comment les deux graphes fonctionnels de la figure 2.11 peuvent être considérés comme identiques.

Pour l'automate de transport des paquets, le graphe initial permet de construire le graphe fonctionnel de la figure 2.12, lequel conduit directement au réseau de CUSA de la figure 2.13.

2.3. Simplifications du graphe fonctionnel

L'étape fondamentale dans la synthèse d'un automate vient d'être examinée. Nous étudions maintenant deux étapes supplémentaires non indispensables qui permettent néanmoins quelques simplifications au niveau du réseau cablé résultant : la première consiste à grouper des états dans certaines conditions et la seconde à rechercher des états sources qui permettent une mise en conditions initiales automatique du système et dans certains cas la suppression d'un certain nombre de fils et cellules.

2.3.1. Groupement d'états.

Pour que, dans un graphe fonctionnel, des états soient groupables, il faut :

(A) les états de sortie identiques
(B) les variables indéterminées pour le nouvel état, différentes de celles qui en font arriver et partir.

Le graphe résultant est toujours fonctionnel puisque les conditions (I), (II) et (III) restent satisfaites.

2.3.1.1. Groupement de deux états consécutifs.

C'est le cas du graphe de la figure 2.14.1 qui devient celui de la figure 2.14.2.

Nous avons bien :

$$\sigma_{q_1} = \sigma_{Q_2}$$

$$(\alpha_{q_1 q_2} \cup \delta_{q_1 q_2}) \cap \phi_{q_1 q_2} = \emptyset$$

et nous pouvons remarquer en outre sur ce graphe que la variable conditionnant deux transitions vers q_1 et q_2 disparaît quand c'est elle qui permet le groupement entre ces deux états ; par contre, il faut l'introduire pour les transitions vers des descendants quand une même variable d'entrée fait commuter vers des états différents à partir de q_1 et q_2.

Cas particulier de groupement impossible (figure 2.15)

Ce graphe correspond physiquement au cas où la variable d'entrée qui provoque une action est remise dans son état initial dès l'apparition de cette même action. Le groupement $q_1 q_2$ est interdit puisque e_j appartiendrait à la fois à $\phi_{q_1 q_2}$ et $\alpha_{q_1 q_2} \cup \delta_{q_1 q_2}$.

2.3.1.2. Groupement de plus de deux états

Prenons l'exemple de la figure 2.16. Du graphe initial 2.16.1, nous obtenons celui de la figure 2.16.4. Sur le tableau d'états correspondant de la figure 2.16.5, de nombreuses transitions sont ajoutées par rapport à celui de la figure 2.16.2, mais elles ne perturbent en rien le fonctionnement de l'automate puisqu'elles ne se produiront jamais.

Dans l'exemple de la figure 2.17, les conditions de groupement sont satisfaites pour q_2 et q_4 ainsi que pour q_3 et q_4 mais non pour l'ensemble $q_2q_3q_4$. C'est pourquoi les deux graphes fonctionnels de la figure 2.11 représentant chacun des deux cas de groupement ont un fonctionnement identique.

Cas d'états pseudo-équivalents (figure 2.18)

q_1, q_2 et q_3 peuvent être groupés en même temps puisque les conditions (A) et (B) sont satisfaites. Le graphe réduit est celui de la figure 2.19.2.

q_1 et q_3 peuvent aussi être groupés, indépendamment de q_2, puisqu'ils satisfont les conditions (A) et (B). Le graphe correspondant est celui de la figure 2.19.1. q_1 et q_3 sont en fait des états pseudo-équivalents car ils possèdent le même état d'entrée.

Pour l'automate de transport des paquets, le graphe fonctionnel de la figure 2,12 ne comporte pas de possibilité de groupement, c'est un graphe fonctionnel irréductible. (C'est en général toujours le cas quand on l'établit de cette façon).

2.3.2. Recherche des états-sources.

Comme nous l'avons précédemment envisagé dans le premier chapitre, nous nous limiterons à la recherche des états sources évidents, leur intérêt principal étant de fournir une mise en conditions initiales automatique du réseau et la suppression de connexions apportée étant intéressante dans certains cas.

Un état source évident, étant seul dans sa colonne dans le cas d'une représentation par tableau d'états, est caractérisé par le fait que son état d'entrée lui est propre. Nous utilisons cette notion pour leur recherche, notion qui va demander la connaissance de l'état d'entrée de tous les états du graphe fonctionnel irréductible ou non.

Connaissant l'existence d'un état source, il faut ensuite trouver les entrées primaires de la CUSA correspondante, celles-ci devant être en nombre minimum surtout dans le cas d'automates comportant un très grand nombre d'entrées, le monome complet rendant la réalisation technologique difficile.

Prenons comme exemple le cas de l'automate de transport des paquets.

A la lecture du graphe 2.12, les variables d'entrée connues de α_1 sont P et D, celles de α_2 sont P' et H' ... On peut ainsi établir le tableau initial de la figure 2.20. Pour compléter ce tableau, il faut parcourir une chaine du graphe de la valeur connue d'une variable pour un état jusqu'à la commutation de cette même variable. Pour tous les états de cette chaine, la variable garde sa valeur origine. Ainsi, la variable B pour δ garde cette valeur pour ε et on obtient le tableau 2.21.

On peut alors écrire le monome caractéristique de α_1, monome qui caractérise son état d'entrée :

$$M_{\alpha_1} = P.H'.D.G'$$

Pour savoir si α_1 est source, il suffit d'effectuer le produit de M_{α_1} par la somme de tous les autres monomes.

Si ce produit est nul, l'état correspondant est source. Ainsi

$$M_{\alpha_1} \left(\sum_{v \in \Omega_{\alpha_1}} M_v \right) = PF'DG' \left(P'F'DG' + FB'G' + B'D'G + F'BD' + P'F'BDG' \right) = 0$$

α_1 est bien un état source.

On peut maintenant chercher à diminuer l'expression de ce monome caractéristique. Ainsi :

$$M^{*}_{\alpha_1} = P.F'.D$$

conduit aussi à :

$$M^{*}_{\alpha_1} \left(\sum_{v \in \Omega_{\alpha_1}} M_v \right) = 0$$

P', F et D' sont donc les trois entrées primaires à cabler sur la CUSA source A_1 (dans le cas d'une technologie utilisant des portes NI).

α_1 étant source, les connexions venant de ses états ascendants δ et ε peuvent être supprimées. De plus, δ et ε, ne contribuant en rien à l'élaboration des sorties et au fonctionnement du réseau, peuvent être supprimés.

Nous obtenons ainsi le graphe fonctionnel simplifié de la figure 2.22 qui conduit à un réseau cablé identique à celui de la figure 1.12.

2.4. Exemples d'application

L'automate de transport des paquets vient d'être traité. Il ne fait intervenir que cinq entrées, deux sorties et peu d'états.

Un second automate un peu plus complexe sera étudié au chapitre 6 comme application à l'intégration à grande échelle.

Les annexes 3 et 4 seront consacrées à la commande séquentielle de deux processus pilote du Laboratoire d'Automatique. Pour la colonne à distiller, l'automate complet comporte 51 entrées et 45 sorties ; il est divisé en sept sous-séquences possédant chacune encore un grand nombre d'entrées et de sorties.

α : DES QUE un paquet arrive sur le tapis A, le plateau monte sous l'action du vérin V1.

β : DES QUE le plateau est en position haute, il se déplace horizontalement sous l'action de V1 et V2.

γ : DES QUE le plateau arrive au-dessus du tapis B, il redescend (V1 est relaché)

δ : DES QUE le plateau est en position basse, le paquet se trouve sur B et le plateau revient vers sa position initiale (V2 est relaché)

ε : DES QUE le plateau arrive à droite, il commence un nouveau cycle SI un paquet est arrivé, SINON, il attend qu'il arrive.

Fig 2.1. cahier des charges

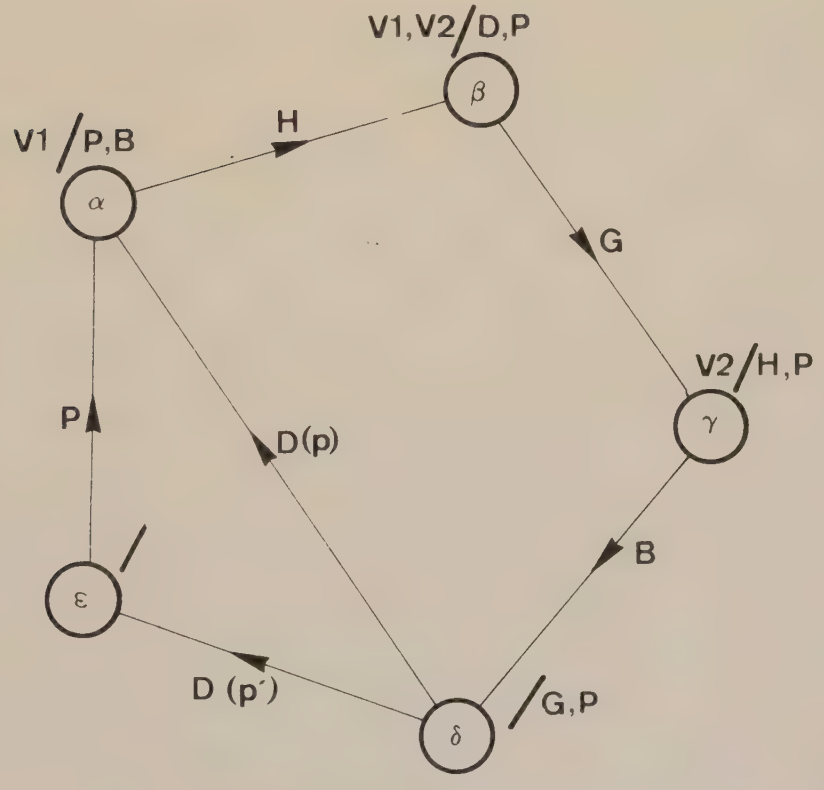


Fig 2.2. graphe initial

Fig 2.3. Graphe primitif

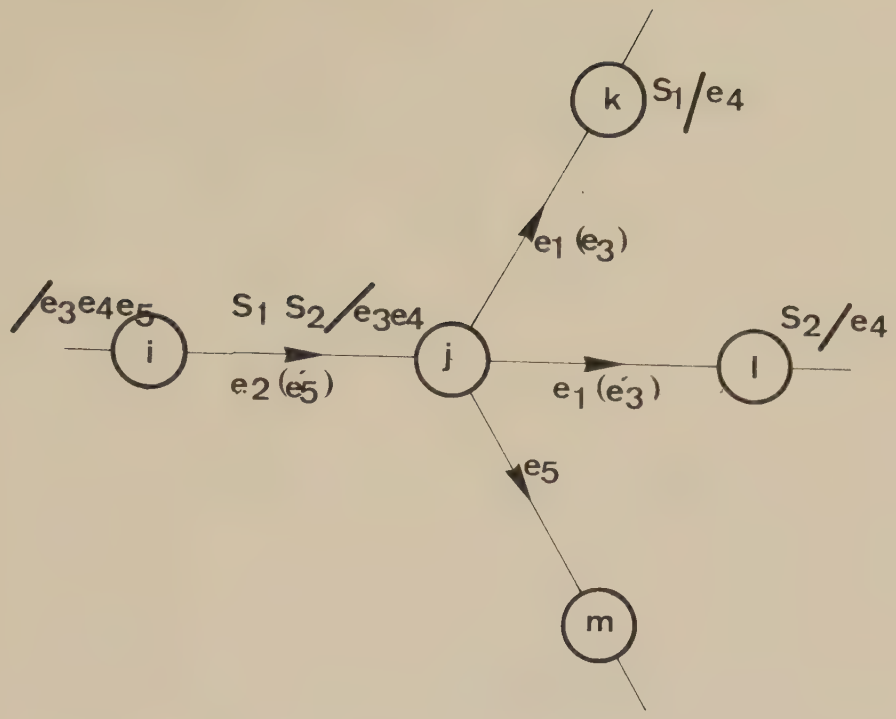


Fig 2.4. écriture du graphe

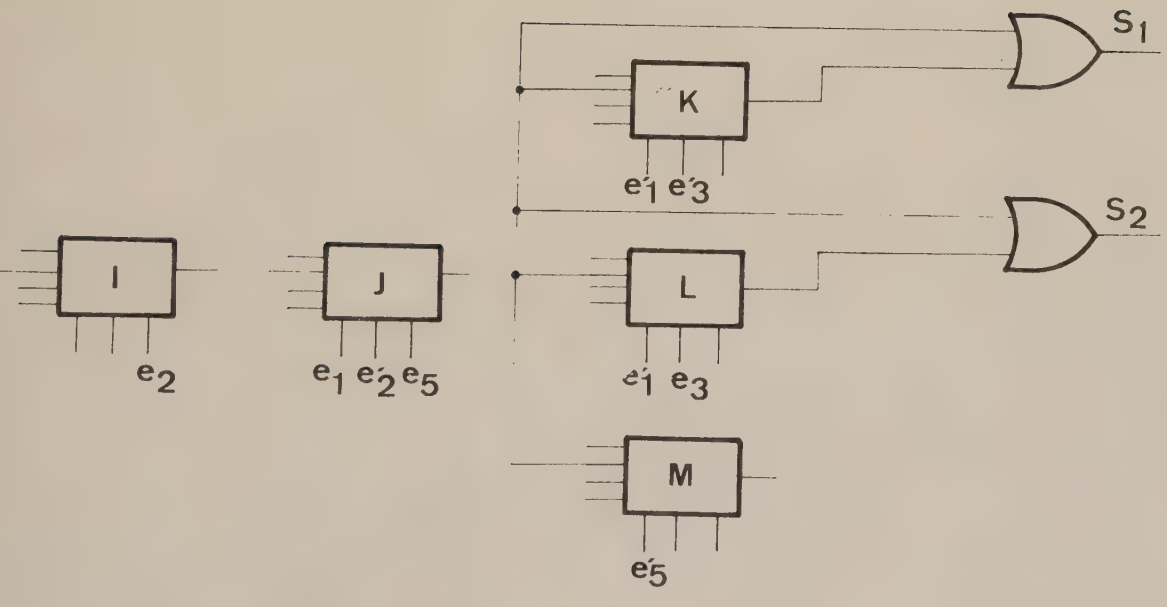


Fig 2.5. cablage du graphe

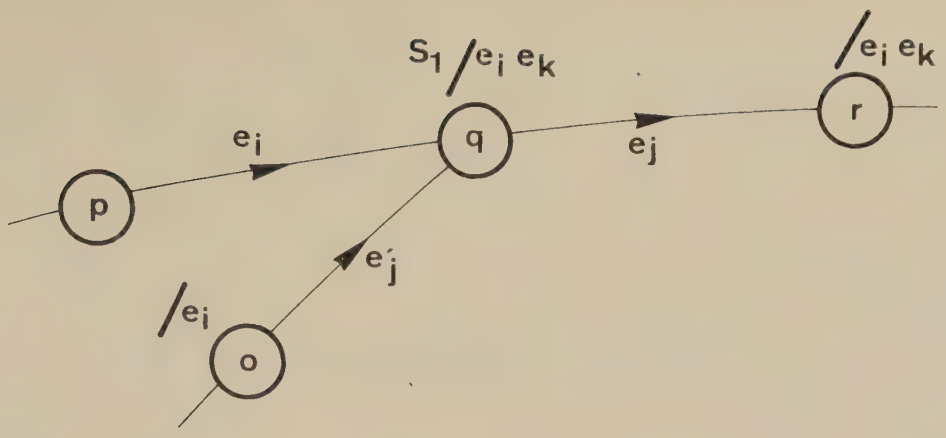
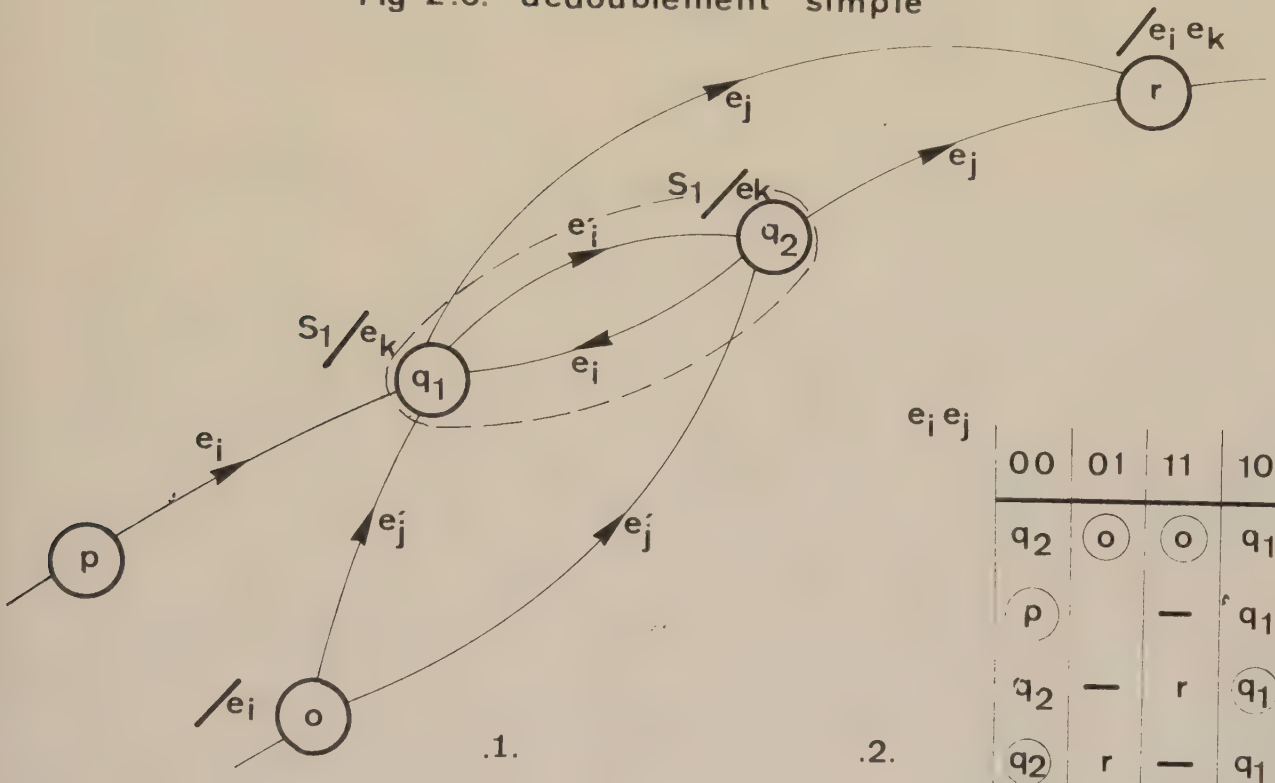


Fig 2.6. dédoublement simple



.1.

ei ej	00	01	11	10	S1
	q2	o	o	q1	0
	p		—	q1	0
	q2	—	r	q1	1
	q2	r	—	q1	1
		r	r		0

.2.

Fig 2.7.

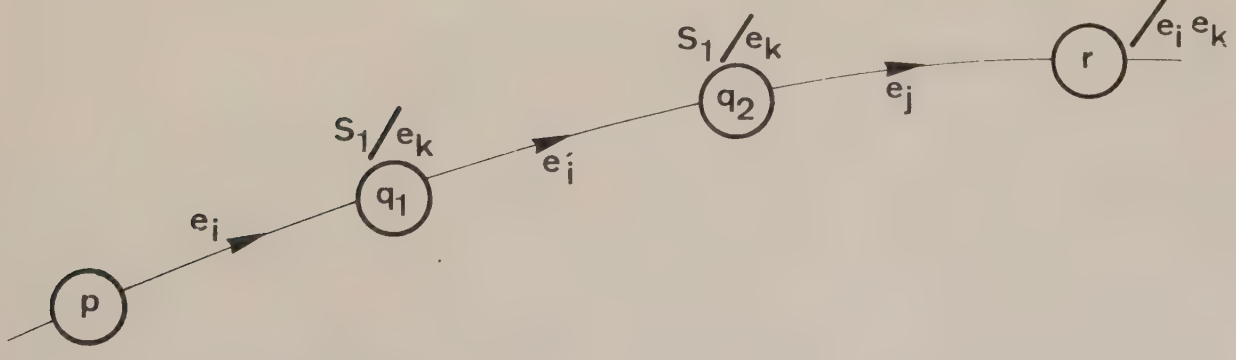


Fig 2.8.

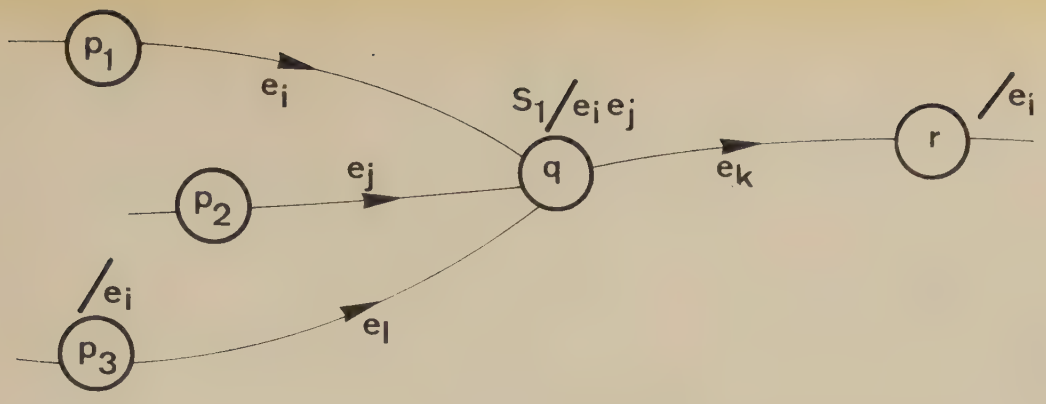


Fig 2.9. dédoublement multiple

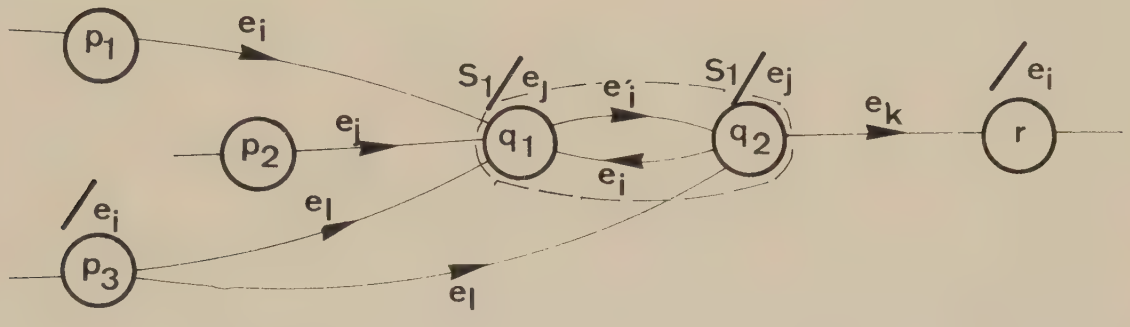
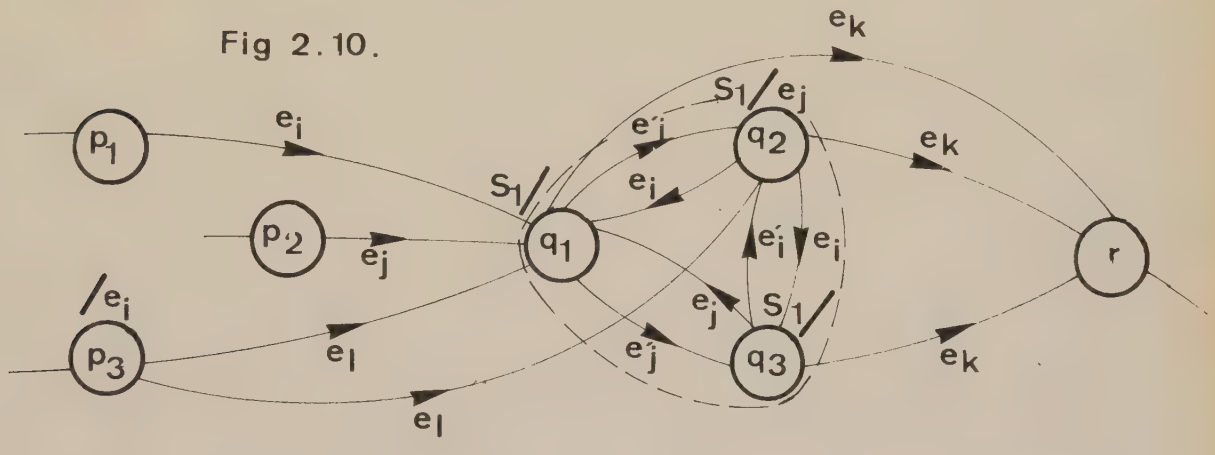
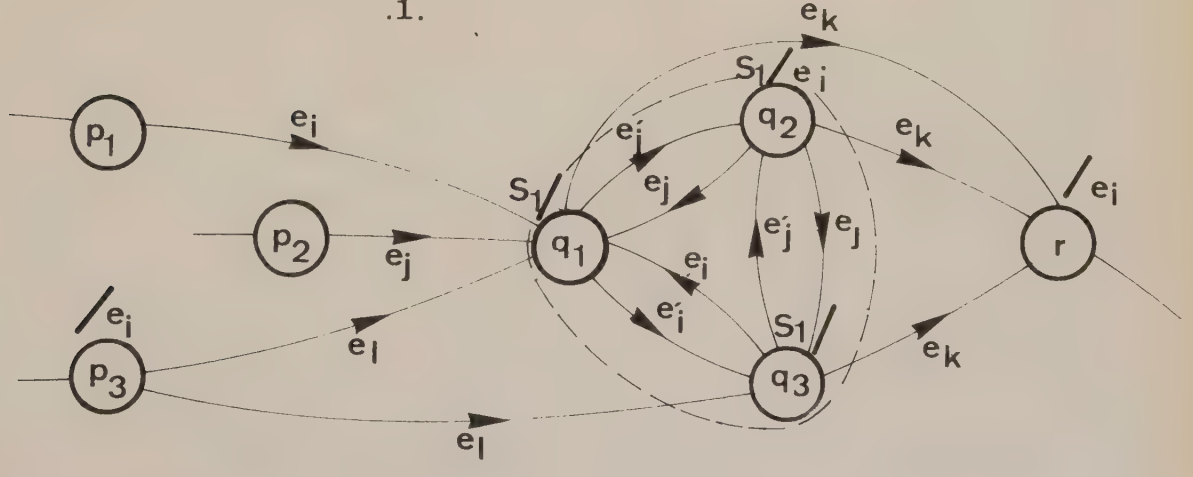


Fig 2.10.



.1.



.2.

Fig 2.11.

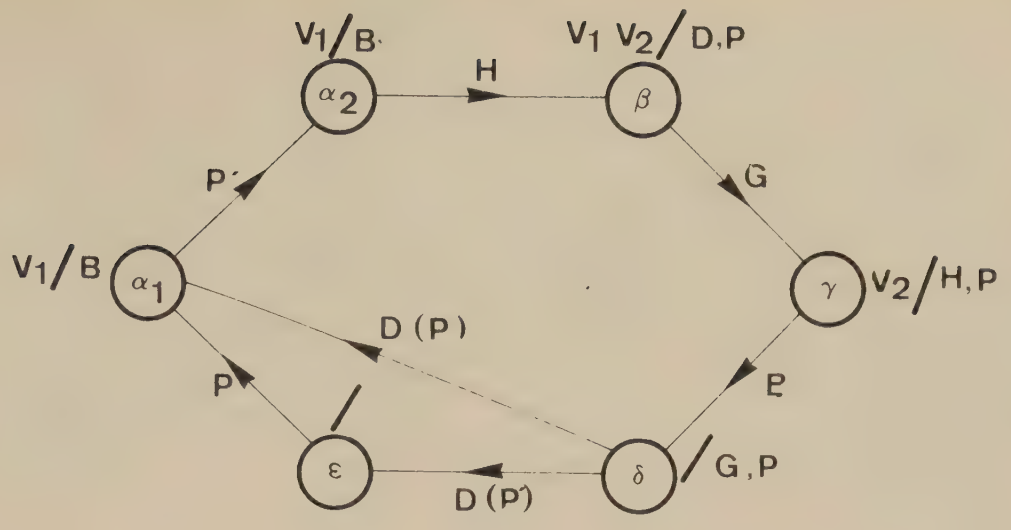


Fig 2.12. graphe fonctionnel

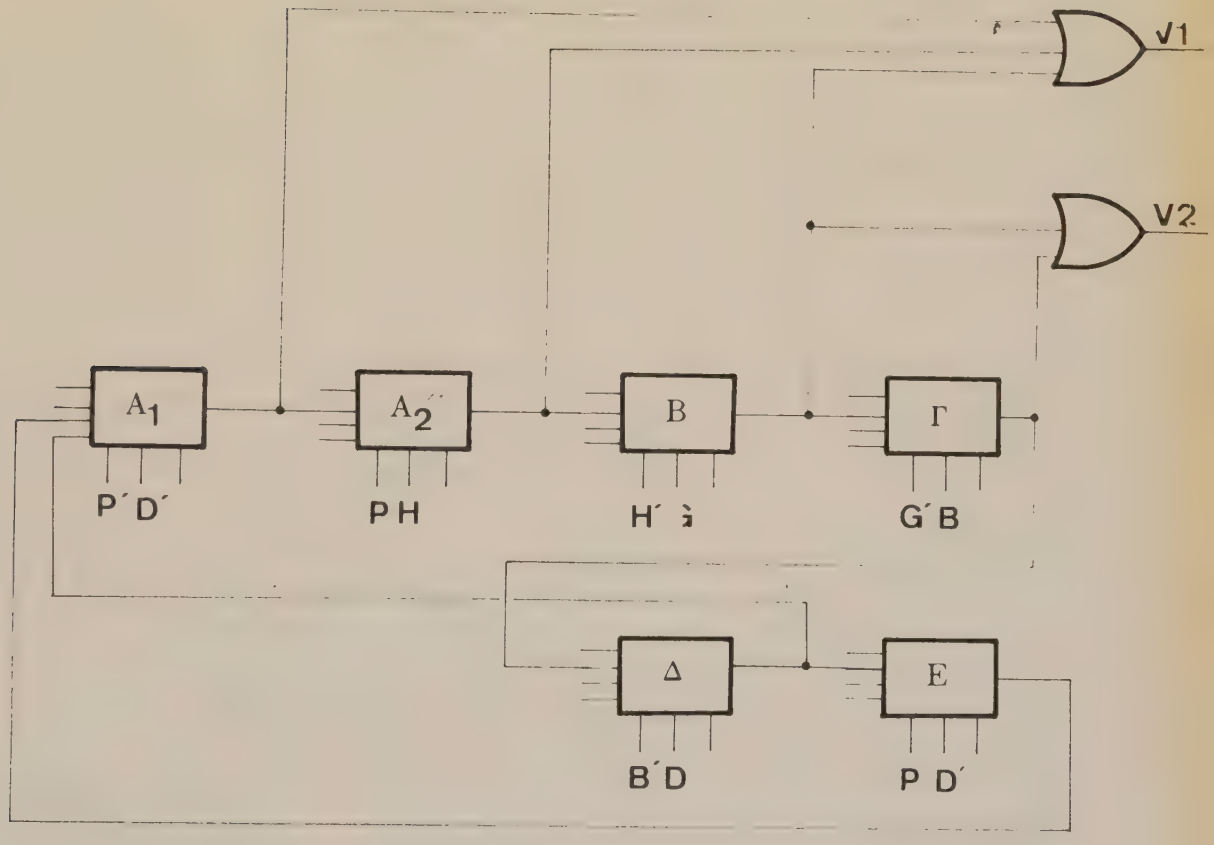


Fig 2.13. cablage du graphe fonctionnel

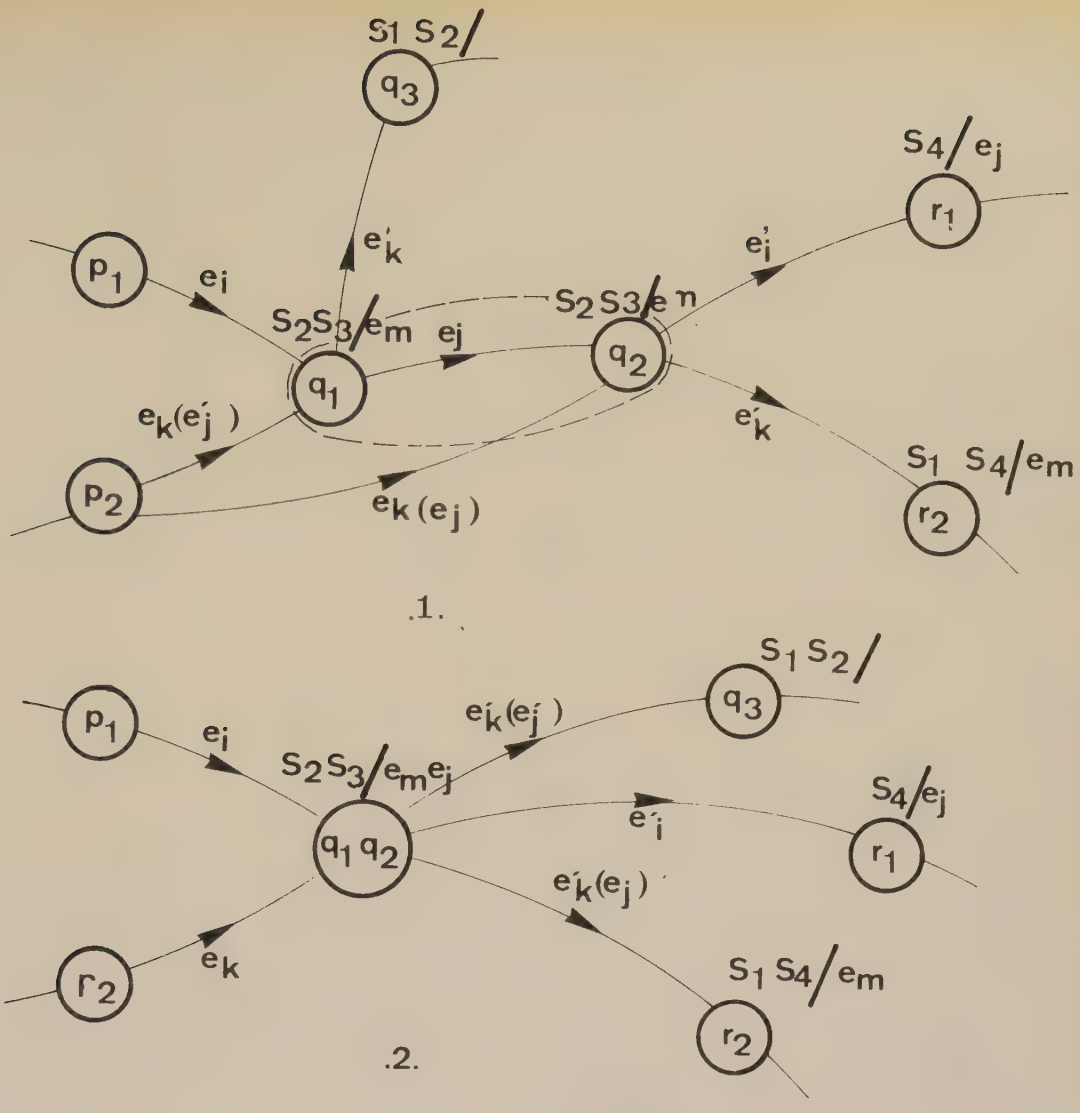


Fig 2.14. groupement de deux etats

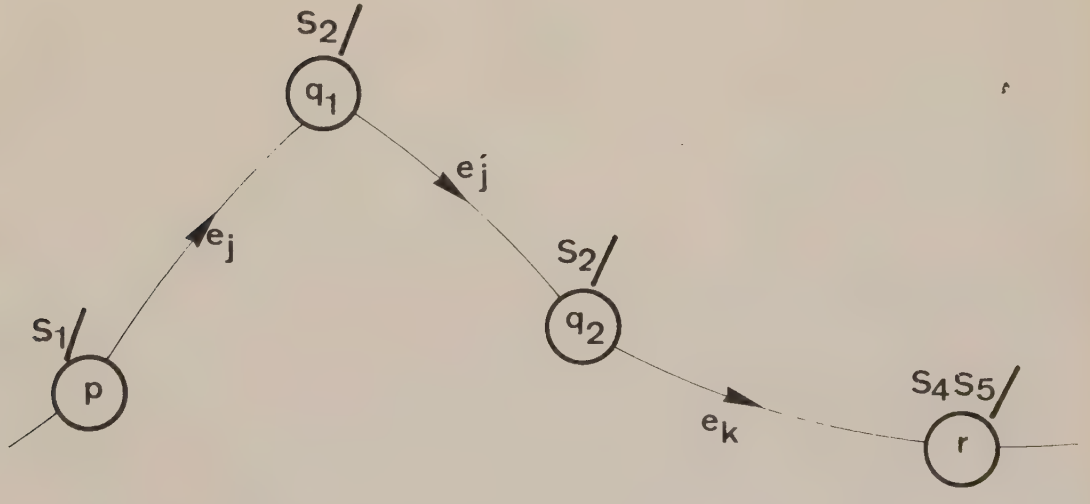
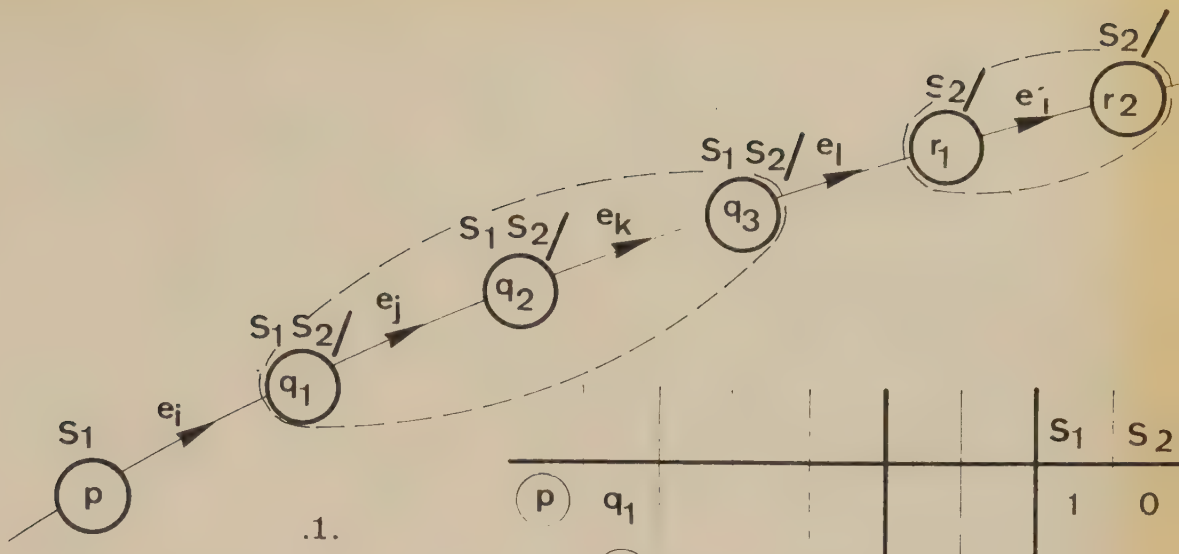


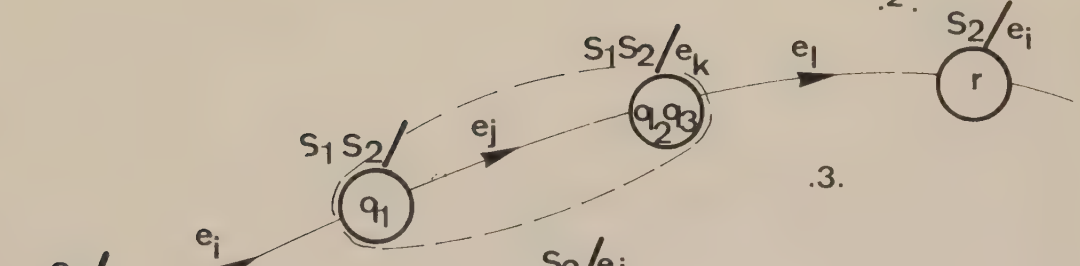
Fig 2.15. groupement impossible



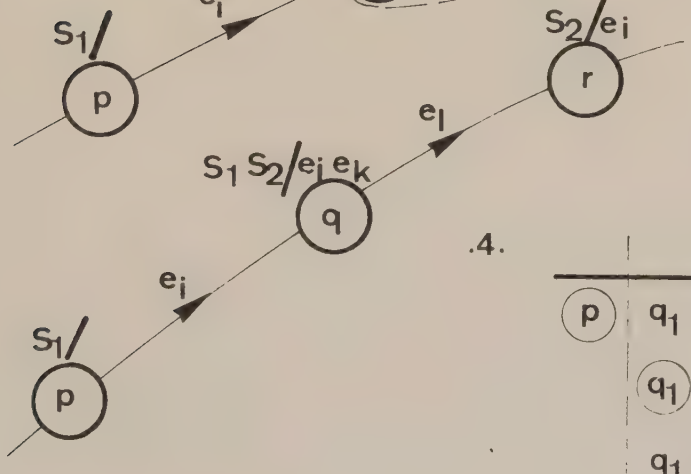
.1.

						S_1	S_2
(p)	q_1					1	0
	(q_1)	q_2				1	1
		(q_2)	q_3			1	1
			(q_3)	r_1		1	1
				(r_1)	r_2	0	1
					r_2	0	1

.2.



.3.



.4.

							S_1	S_2
(p)	q_1	q_2	q_3	q_4			1	0
	(q_1)	q_2	q_3	q_4	r_1	r_2	1	1
	q_1	(q_2)	q_3	q_4	r_1	r_2	1	1
	q_1	q_2	(q_3)	q_4	r_1	r_2	1	1
	q_1	q_2	q_3	(q_4)	r_1	r_2	1	1
					(r_1)	r_2	0	1

.5.

							S_1	S_2
					r_1	(r_2)	0	1

Fig 2. 16. groupement de plusieurs états

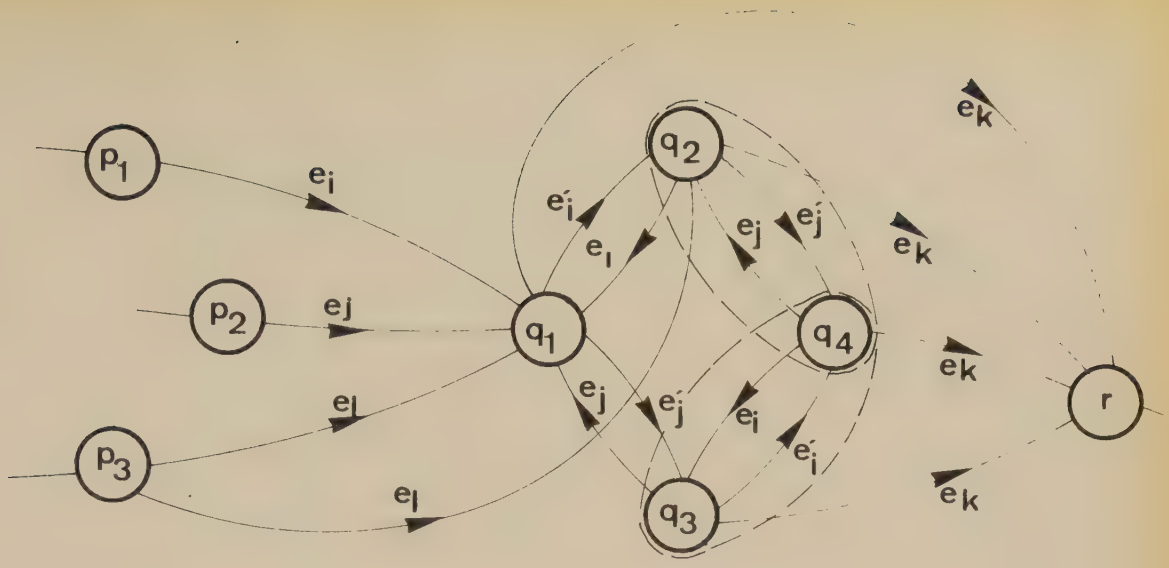


Fig 2.17. groupements non compatibles

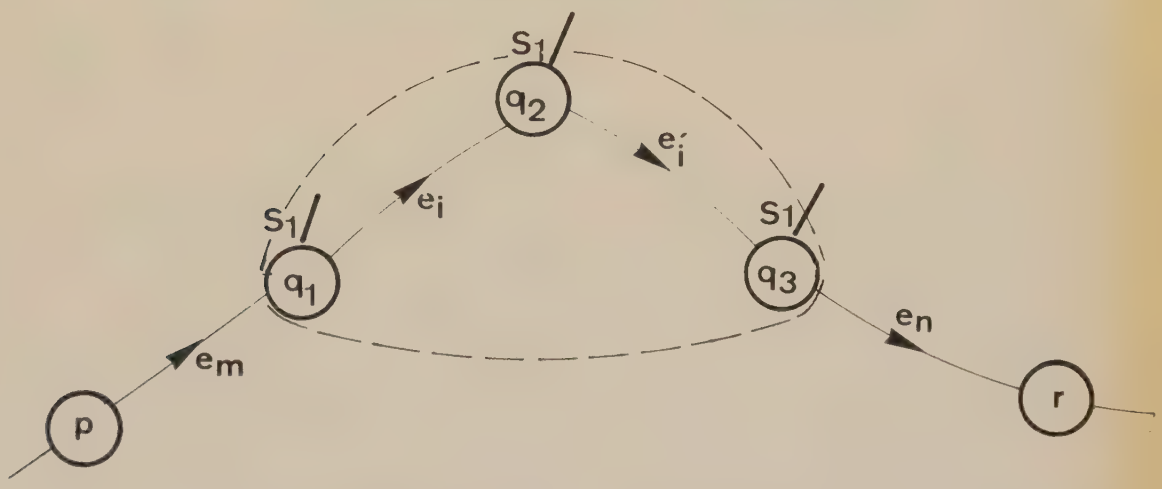


Fig 2.18. états pseudo_équivalents

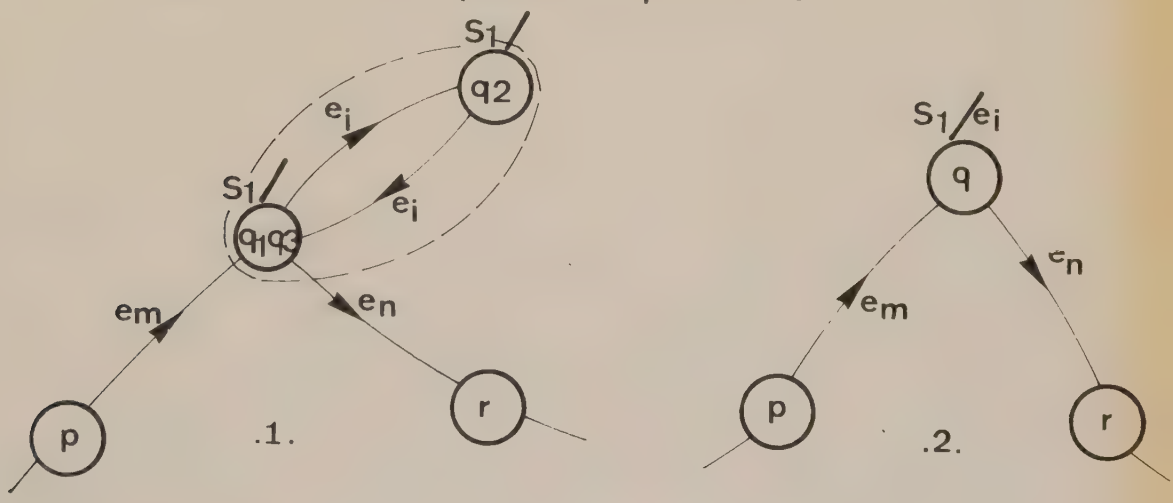


Fig 2.19. groupement d'états pseudo_équivalents

	P	H	B	D	G
α_1	P		—	D	
α_2	P´	H´	—		
β	—	H		—	G´
γ	—	—	B´		G
δ	—		B	D´	—
ϵ	P´			D	

Fig 2.20. tableau initial

	P	H	B	D	G
α_1	P	H´	—	D	G´
α_2	P´	H´	—	D	G´
β	—	H	B´	—	G´
γ	—	—	B´	D´	G
δ	—	H´	B	D´	—
ϵ	P´	H´	B	D	G´

Fig 2. 21. tableau final

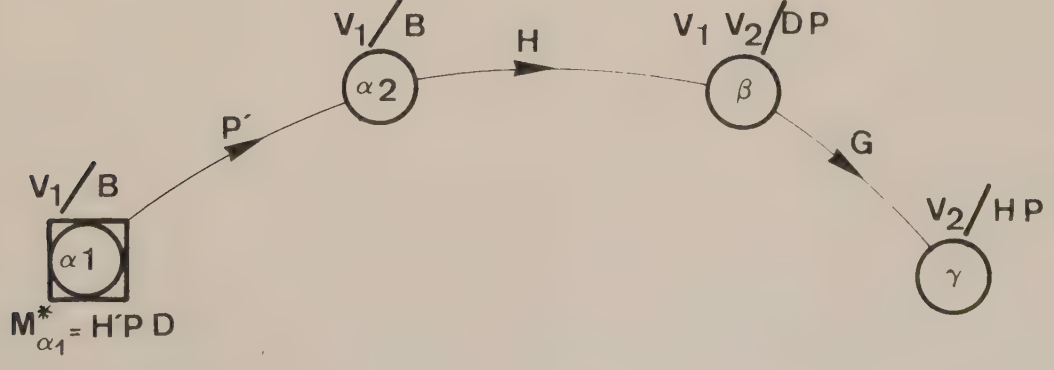


Fig 2. 22. graphe fonctionnel simplifié

P A R T I E 2

INTEGRATION A GRANDE ECHELLE

DES AUTOMATES ASYNCHRONES

EN TECHNOLOGIE METAL-OXYDE-SEMICONDUCTEUR

3. ELEMENTS DE TECHNOLOGIE M.O.S. [13 - 16]

Avant de passer à l'étape technologique de notre sujet, celle qui conduit à la réalisation du réseau de cellules, nous allons donner quelques éléments nécessaires sur la technologie M.O.S. que nous utilisons.

3.1. Rappels sur le transistor M.O.S.

3.1.1. Explication qualitative du fonctionnement du transistor M.O.S.

La structure d'un transistor M.O.S. à enrichissement à canal p est représentée sur la figure 3.1, sa représentation symbolique étant celle de la figure 3.2.

Le transistor M.O.S. est constitué par deux plots de type p : la source S et le drain D diffusés dans du silicium de type n et très voisins l'un de l'autre (≃ 10 µ). L'électrode de commande G, appelée grille, est constituée par un dépôt d'aluminium fait sur l'oxyde protecteur au-dessus de l'espace séparant les deux plots. L'épaisseur de l'oxyde n'est à cet endroit que de 0,1 µ tandis qu'elle vaut 1,2 µ partout ailleurs.

La source est généralement reliée à la masse ainsi que le support n de silicium appelé substrat B. Le drain est porté à un potentiel négatif. Lorsque le potentiel négatif de la grille est faible, il n'y a aucune conduction entre S et D puisque la jonction drain est polarisée en inverse. Mais au fur et à mesure que ce potentiel augmente, le champ électrique résultant repousse les électrons libres du silicium n loin de la surface pour y attirer les trous mobiles. Lorsque ce potentiel dépasse une certaine tension V_S dite tension de seuil, un nombre suffisant de trous est accumulé en surface

entre les deux plots pour permettre le passage d'un courant entre S et D dans le canal d'inversion de type p ainsi créé.

3.1.2. Equations fondamentales et réseau de caractéristiques

Suivons l'évolution du courant I_{ds} dans le canal en fonction de la tension $V_{ds} = V_d - V_s$ pour une tension V_{gs} supérieure à la tension de seuil V_s.

Pour V_{ds} très faible, le champ électrique dû à la grille est pratiquement uniforme et l'épaisseur de la couche d'inversion est constante ; le transistor se comporte alors comme une résistance et la caractéristique est rectiligne.

Quand V_{ds} devient plus négative, la forme du canal se modifie pour se rapprocher de la surface. L'amincissement du canal du côté du drain vient du fait que la différence de tension grille-substrat passe de la valeur V_{gs} près de la source à la valeur $V_{gs} - V_{ds}$ près du drain.

Pour une certaine valeur de V_{ds}, il se produit une coupure du canal près du drain, ce qui conduit à une limitation du courant I_{ds}. Cette tension V_{ds} est alors égale à $V_{gs} - V_s$.

Pour une tension V_{ds} encore supérieure, la couche d'inversion ne relie plus le drain avec la source. Il y a directement injection des porteurs p avec une vitesse limite dans la zone de charge d'espace de la jonction, si bien que le courant I_{ds} est pratiquement indépendant de V_{ds} : la caractéristique correspondante devient horizontale.

Un réseau de telles caractéristiques $I_{ds}(V_{ds})$ pour différentes valeurs de V_{gs} est donné sur la figure 3.3.

Les expressions du courant I_{ds} sont les suivantes :

. pour $V_{ds} \leqslant V_{gs} - V_s$:

$$I_{ds} = \bar{\mu} C_{ox} \frac{Z}{L} \left((V_{gs} - V_s) V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right)$$

. pour $V_{ds} > V_{gs} - V_s$:

$$I_{ds} = \bar{\mu} C_{ox} \frac{Z}{2L} (V_{gs} - V_s)^2$$

. la limite séparant les deux zones est donnée par :

$$I_{ds} = \bar{\mu} C_{ox} \frac{Z}{2L} V_{ds}^2$$

avec :

$C_{ox} = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_r}{x_o}$: capacité de l'oxyde par unité de surface

- ε_o : permittivité du vide
- ε_r : constante diélectrique de l'oxyde de silicium SiO_2
- x_o : épaisseur de l'oxyde fin

$\bar{\mu}_n$: mobilité moyenne en surface des électrons
Z : longueur de la grille
L : intervalle séparant les deux puits diffusés.

La valeur approchée de la tension de seuil est :

$$V_s = - \frac{Q_{SS} + Q_B}{C_{ox}}$$

Q_{SS} : densité des états de surface

$Q_B = N_a \cdot x_d$

- N_a : densité d'atomes donneurs
- x_d : profondeur de la zone de transition.

3.1.3. Schéma équivalent du transistor M.O.S.

Les courbes données précédemment sont caractéristiques du fonctionnement statique du transistor. Pour refléter son fonctionnement dynamique, il faut lui ajouter toutes ses résistances et capacités parasites qui vont limiter ses possibilités de rapidité en commutation.

Le schéma équivalent physique complet comporte de nombreux paramètres. Pour les calculs de simulation que nous verrons en 4.3., nous utilisons un modèle plus simple de T-MOS, celui de la figure 3.4.

Sur ce modèle apparaissent :

- le générateur de courant I_{ds} (V_{ds}, V_{gs})
- les capacités parasites entre grille et source d'une part, grille et drain d'autre part, capacités de valeurs semblables et dépendant principalement des dimensions géométriques du transistor

$$C_{gs} \simeq C_{gd} \simeq C_{ox} \frac{Z.L}{2}$$

- C_{sb} et C_{bd} sont les capacités de transition des diodes source et drain.

$$C_{sb} = C_{to} \frac{S_s}{\left(1 + \frac{V_{bs}}{V_\ell}\right)^{1/3}}$$

$$C_{bd} = C_{to} \frac{S_d}{\left(1 + \frac{V_{ds}}{V_\ell}\right)^{1/3}}$$

avec :

$C_{to} \simeq 1,6 \cdot 10^{-4}$ pF/μ^2

$V_\ell \simeq 0,8$ V

S_s : surface de la diffusion source

S_d : surface de la diffusion drain.

3.1.4. Processus technologique de fabrication du transistor M.O.S.

Les principales étapes de fabrication sont données sur la figure 3.5.

Les circuits sont réalisés dans des tranches de silicium dont le diamètre varie entre deux et cinq centimètres et dont l'épaisseur est de l'ordre de 200 µ.

. Après polissage mécanique, chimique et nettoyage, les tranches sont oxydées dans un four chauffé à 1200° C et traversé par de l'oxygène humide.

. Avec le premier masque photographique, on ouvre par photogravure des fenêtres correspondant aux sources et drains des transistors M.O.S.

. On réalise ensuite la diffusion du bore à travers les ouvertures précédentes. A la fin de l'opération, les diffusions ont une épaisseur de 3 µ et elles sont recouvertes par 6000 A d'oxyde SiO_2.

. Avec le second masque, on grave les grilles, puis on fait croître l'oxyde de grille que l'on fait suivre généralement d'une passivation au phosphore.

. Avec le troisième masque, on grave les contacts drain et source.

. Ensuite, on évapore une couche d'aluminium de 1 μ d'épaisseur sur l'ensemble de la plaquette et finalement le quatrième et dernier masque assure les interconnexions entre les différents éléments.

Ces opérations sont les opérations collectives : elles nécessitent quatre microphotomasques. Viennent ensuite les opérations individuelles identiques pour tous les circuits intégrés : découpage, montage, thermocompression et encapsulage.

3.1.5. Comparaison des technologies M.O.S. et bipolaire.

Les raisons qui nous ont conduit à adopter la technologie M.O.S. pour l'intégration à grande échelle des automates asynchrones sont celles maintenant classiques pour l'élaboration des circuits de grande complexité.

Les principaux avantages sont les suivants :

. la fabrication comporte moins d'opérations et moins de masques ;

. la technique est homogène : tous les éléments sont des transistors ·

. le T-MOS occupe moins de surface que le bipolaire.

Son inconvénient majeur reste encore sa limitation en fréquence. La vitesse maximale de fonctionnement de notre dispositif est de 2 MHz (front haut du créneau = front bas = 250 ns). Pour notre circuit, cet inconvénient n'était pas majeur du fait qu'il est utilisé pour des automates du type industriel fonctionnant toujours à des fréquences relativement basses. Des transitions rapides permettent néanmoins de diminuer le seuil des variations simultanées (point essentiel en logique asynchrone).

3.2. Le circuit logique élémentaire en technologie M.O.S. la porte NI mono-entrée.

Le transistor M.O.S. se comporte à la fois comme élément actif et comme élément passif.

. Celui de la figure 3.6.1 se comporte comme un élément actif ou comme une résistance dont l'une des extrèmités est reliée à la masse et dont la valeur statique équivalente est :

$$R = \frac{L}{\bar{\mu}_n \cdot C_{ox} \, Z \, (V_{gs} - V_s - \frac{V_{ds}}{2})}$$

. Celui de la figure 3.6.2 se comporte entre source et drain comme une résistance de charge :

$$R = \frac{HT - V}{I_{ds}} \cdot \frac{L}{\bar{\mu}_n \, C_{ox} \, Z \, (\frac{HT - V}{2} + \Delta V - V_S)}$$

La mise en série de ces deux éléments conduit à la porte NI mono-entrée (circuit inverseur de la figure 3.6.3). T1 est le transistor de charge, T2 celui de commande.

L'entrée V_e du circuit se fait sur la grille du transistor de commande et la sortie V_S sur son drain. La représentation topographique d'une telle porte est celle de la figure 3.6.4.

Les points de fonctionnement statique sont représentés sur la caractéristique de la figure 3.7.

3.2.1. Caractéristique statique de transfert entrée/sortie.

Une caractéristique importante pour ce circuit inverseur est la caractéristique de transfert entrée/sortie V_S (V_e) telle que celle de la figure 3.8.

Deux remarques importantes à propos de cette caractéristique :

- le niveau de sortie V_s évolue entre les mêmes limites que le niveau d'entrée : le couplage s'effectue donc directement d'étage à étage.
- la tension V_s varie de façon inverse à celle de V_e, mais elle n'évolue pas tant que V_e n'a pas dépassé une certaine valeur (on retrouve ici l'effet de la tension de seuil).

Pour fabriquer une porte NI à plusieurs entrées e_1 e_2, e_3, il suffit de mettre plusieurs transistors de commande en parallèle. La fonction logique résultante est alors :

$$S = \overline{e_1 + e_2 + e_3}$$

Nous connaissons maintenant l'élément de base de la CUSA, mais avant de construire cette cellule, nous allons étudier les caractéristiques dynamiques du NI qui seront fondamentales pour la suite de l'étude.

3.2.2. Comportement dynamique de la porte NI.

Pour cette étude, nous avons utilisé des circuits existants DPN3 (double porte NI à trois entrées).

Plusieurs portes semblables sont montées en série, la première étant attaquée par les signaux rectangulaires issus d'un générateur H.F. suivant la figure 3.9.

L'allure des signaux résultants est donnée par la figure 3.10.

En S1, la descente du signal est environ dix fois plus rapide que la montée. Pour les portes suivantes, c'est le phénomène inverse : un certain retard pur étant introduit par la tension de seuil (voir caractéristique statique figure 3.8).

A ce niveau, nous apercevons qu'il faut nous donner une définition précise des temps de propagation du signal correspondant bien à la mesure du décalage qui apparaît entre l'entrée d'une porte et sa sortie. En général, les temps de commutation sont ceux compris entre 10 et 90 % des caractéristiques de montée et de descente. Pour nous, il était beaucoup plus intéressant de connaître le temps que met le signal pour se propager à travers un élément, c'est pourquoi nous avons pris celui séparant le milieu de la caractéristique d'entrée avec le milieu de la variation résultante de la sortie ; ce temps étant facile à mesurer et correspondant approximativement à la tension de seuil, donc au moment de commutation de la porte considérée.

Avec cette définition, nous pouvons facilement mesurer les temps de propagation à la montée m et à la descente d de la sortie de chaque porte.

Pour HT = 12 V et THT = 24 V on a ainsi :

	$d_{(\mu s)}$	$m_{(\mu s)}$
porte 1	0,5	5,5
porte 2	16,5	6,5
porte 3	25	0,5
porte 4	19,5	0,5

Nous pouvons observer également l'effet des variations des tensions d'alimentation sur m et d.

pour la porte 2

HT	THT	$d_{(\mu s)}$	$m_{(\mu s)}$
10	24	19	6,5
12	24	16,5	6,5
10	28	14	6
12	28	9,2	5
14	28	9,4	5,5

Les valeurs de m et d varient dans des proportions relativement importantes et même l'une par rapport à l'autre avec HT et THT. Ce seraient des paramètres intéressants que nous ne pouvons malheureusement pas utiliser, les valeurs standardisées étant généralement 12 et 24 V.

Un facteur également important est la capacité introduite à la sortie de la porte : d et m augmentent rapidement avec cette capacité.

Finalement, nous avons la possibilité de jouer sur les dimensions géométriques des transistors de charge et de commande de la porte, l'expression mathématique complexe de m et d les faisant intervenir. Ces variations de dimensions sont toutefois limitées pour différentes raisons :

- la surface occupée par le transistor sur la pastille de silicium doit rester dans des limites raisonnables ;
- la consommation en courant de la porte ne doit pas être trop élevée pour des raisons de dissipation thermique rapidement considérable dans les circuits de grande complexité.

Conséquence intéressante de ces variations de dimensions : si les transistors de commande sont différents pour une même porte à plusieurs entrées, les temps de propagation seront différents pour chacune de ces entrées.

Cette remarque s'ajoutant au fait que l'on a toujours d > m va nous permettre de réaliser une CUSA ne possédant pas de retard supplémentaire à la suite de ses deux portes bouclées.

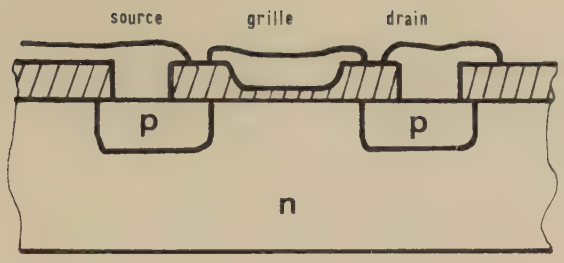


Fig 3. 1. coupe de T.MOS

Fig 3.2. T.MOS

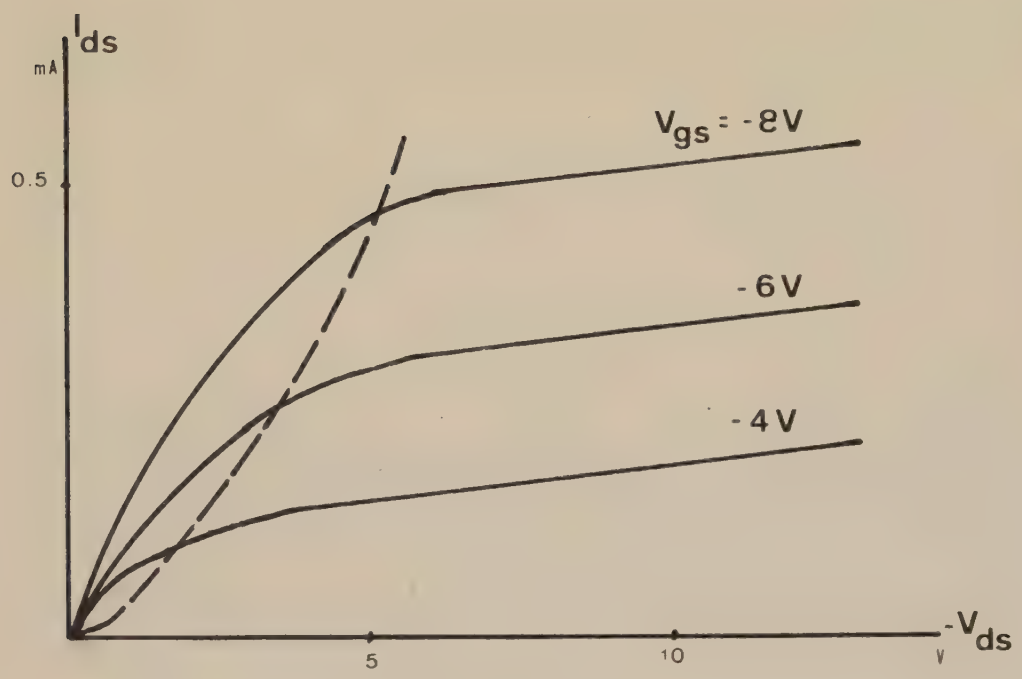


Fig 3.3. caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$

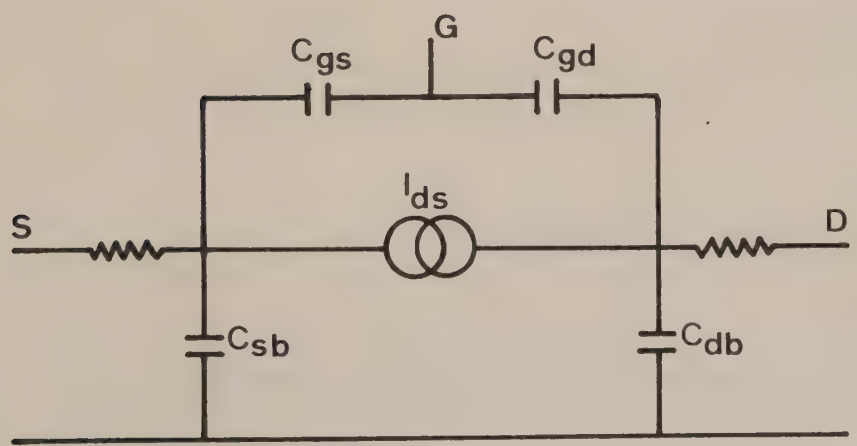
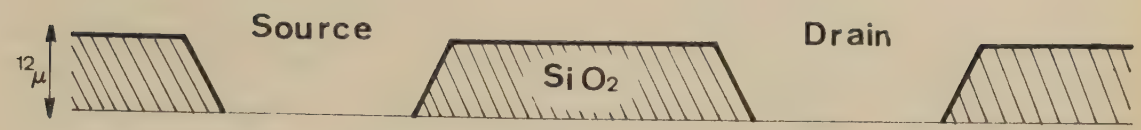
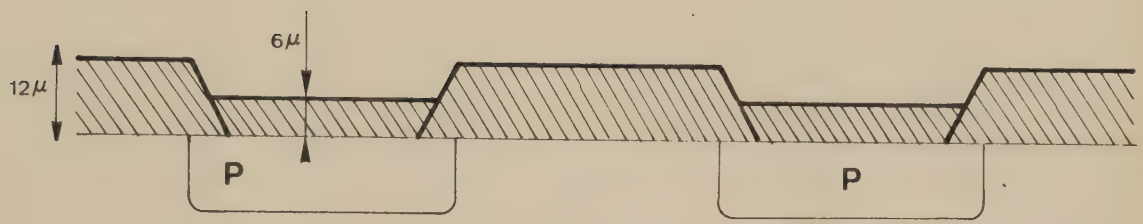


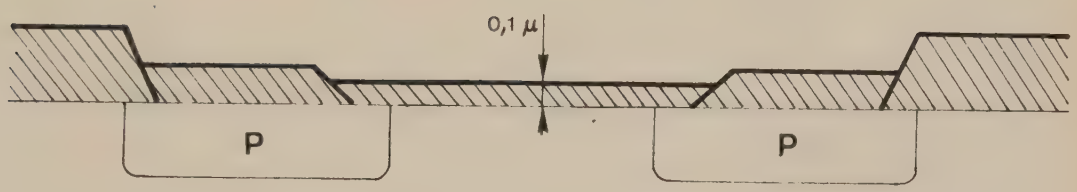
Fig 3.4.



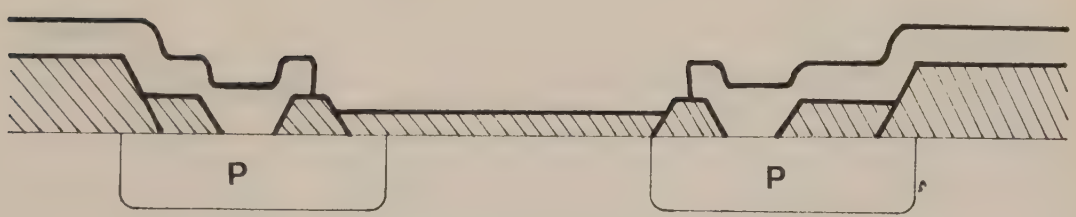
premier masque



diffusion

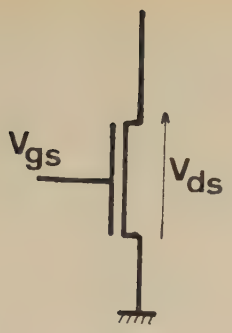


second masque

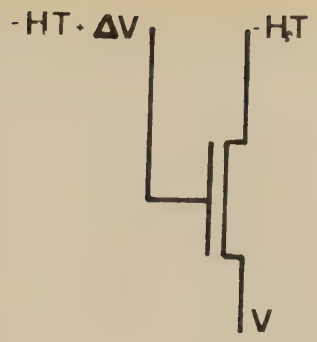


troisième et quatrième masques

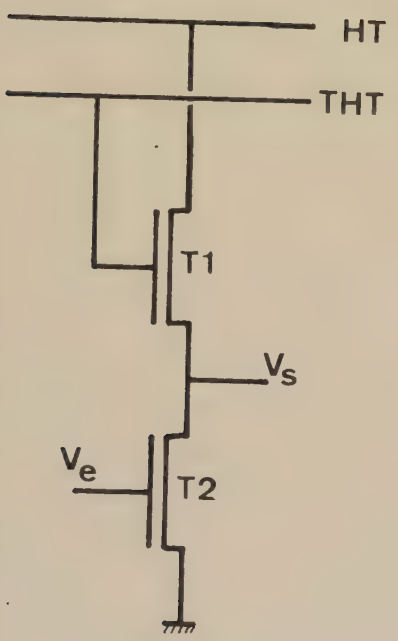
Fig 3.5. fabrication du T.MOS



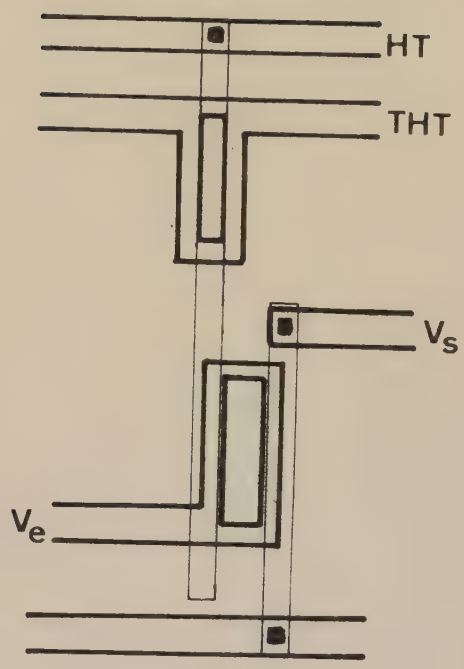
.1.



.2.



.3.



.4.

Fig 3.6.

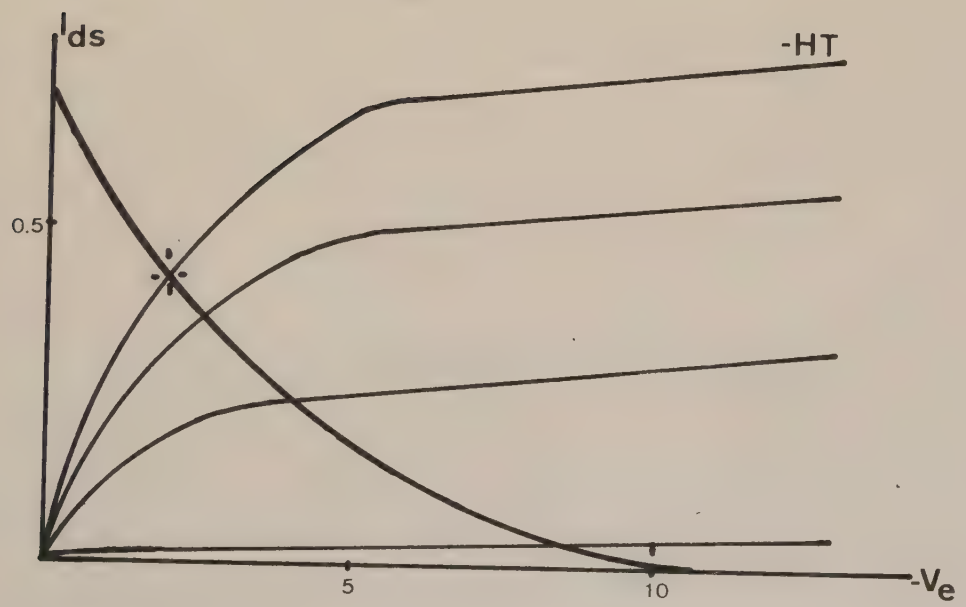


Fig 3. 7.

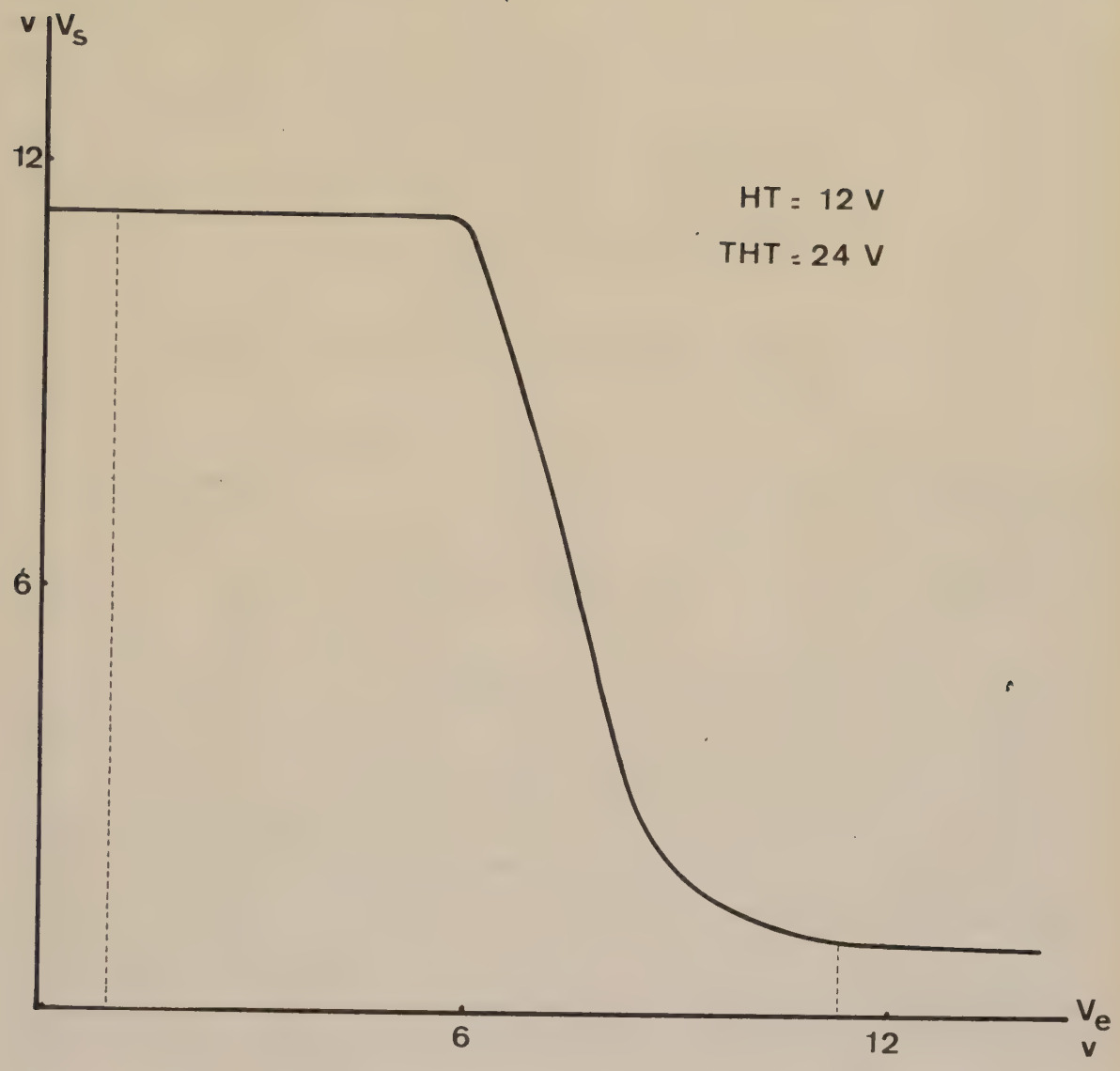


Figure 3.8. caractéristique statique

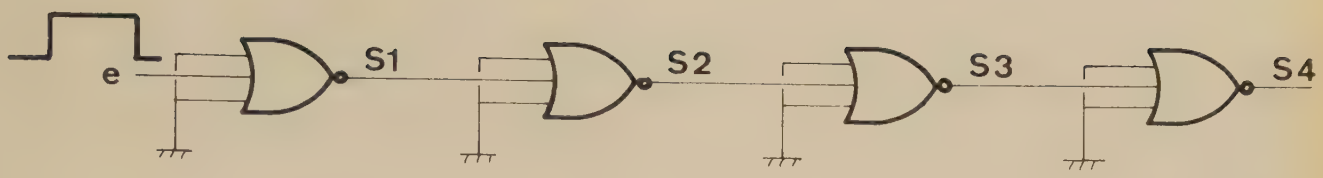


Figure 3. 9.

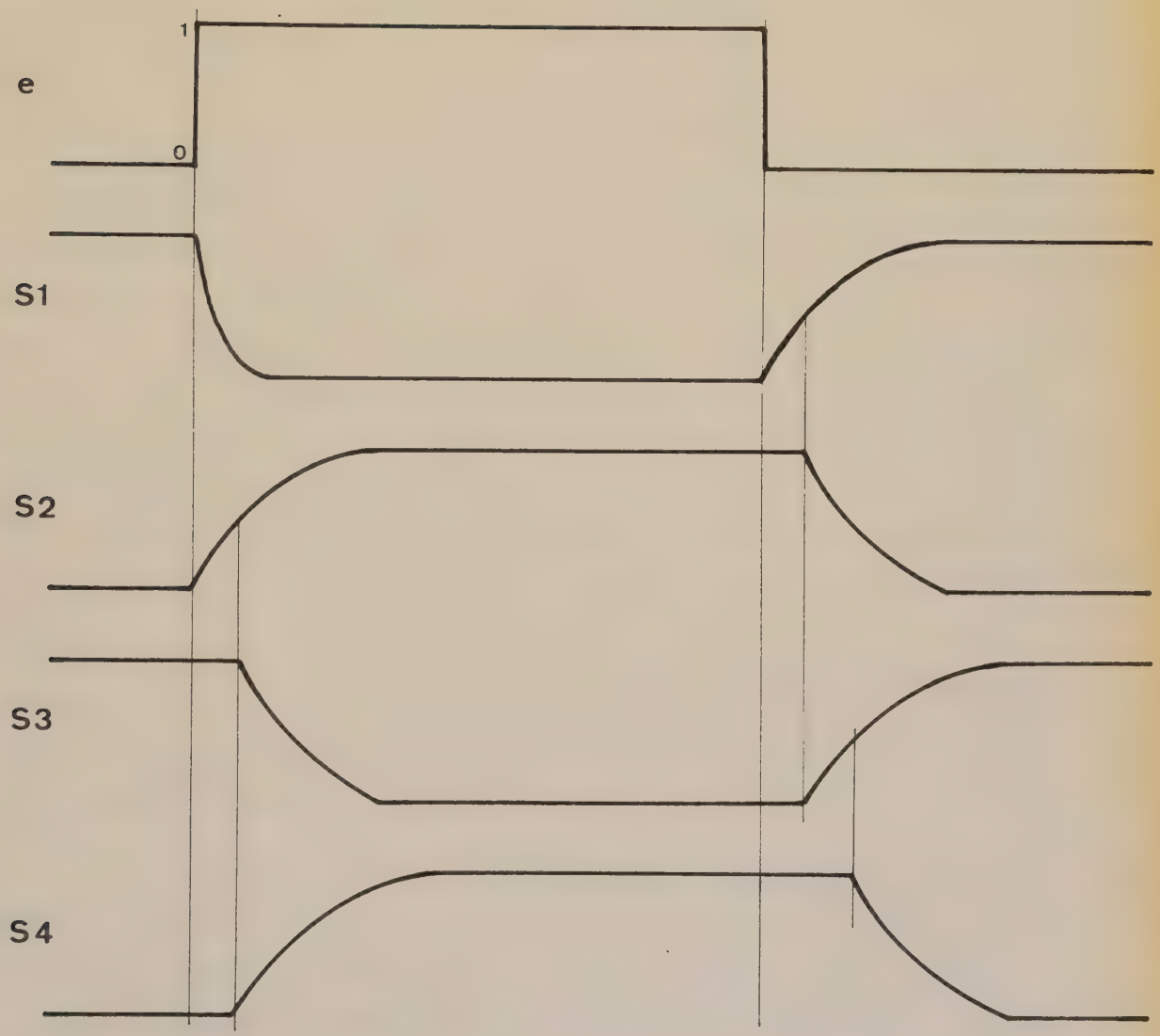


Figure 3. 10.

4. DEFINITION ET DESCRIPTION DE LA CUSA [14]

4.1. Caractéristiques générales

Nous connaissons les caractéristiques théoriques de la cellule et les conditions d'utilisation de la technologie M.O.S. ainsi que ses possibilités. Nous allons donner maintenant toutes les conditions d'utilisation afin de définir exactement les paramètres de la cellule pour qu'elle ait un fonctionnement correct pour tous les automates que l'on se propose d'intégrer.

- Le nombre d'entrées primaires et secondaires de la cellule est un paramètre très important puisque c'est lui qui, d'un côté détermine sa taille, et de l'autre donne les possibilités de réalisation des réseaux. Plus nous nous intéressons à des circuits de complexité croissante et plus ce nombre d'entrées doit être important ; malheureusement, la taille de la cellule croît rapidement, si bien qu'elle reste mal utilisée pour les systèmes de complexité moyenne. Pour cette raison, nous avons trouvé un compromis : chaque cellule comporte trois entrées primaires e_p et quatre entrées secondaires e_s. Il a été montré [3] que cette configuration permet de réaliser tous les systèmes comportant trois entrées ; elle permet aussi de construire un très grand nombre d'automates industriels, ces derniers possédant de nombreuses entrées mais un graphe presque cyclique (nous sortons d'un état par la commutation d'une ou deux entrées au maximum).

A celà s'ajoute la possibilité de mettre simplement deux cellules en parallèle afin de n'en former qu'une ayant un nombre double d'entrées de chaque type, ce qui permet alors de réaliser une gamme beaucoup plus importante d'automates avec un matériel simple.

- Parallèlement au nombre d'entrées, intervient un autre paramètre important : le nombre d'états de l'automate qui représente sa taille et le nombre de ses sorties, ce qui se traduit technologiquement par la valeur de la sortance de la cellule : chaque sortie étant utilisée pour attaquer les cellules descendantes et pour élaborer les sorties du système. Cette sortance devra être au moins égale à 15 (ce qui autorise 15 descendants dans un cas extrême).

- Dans la perspective d'une intégration à grande échelle de l'automate entier, on élabore une entrée primaire e_p et son complément e'_p avec une bascule RS (figure 4.1) attaquée par une seule entrée. Ceci ajoute un peu de matériel (peu coûteux en I.G.E.) mais a l'avantage d'assurer au front montée un retard constant sur le front descente comme l'indique le diagramme des temps de la figure 4.2.

  Pour ce circuit d'entrée, la sortance des sorties e_p et e'_p est également un facteur important qui détermine la taille des automates réalisables ; supérieure ou égale à 15, elle permet en moyenne de réaliser des automates comportant 30 états.

- Le circuit de sortie associé au circuit d'entrée et à la cellule doit pouvoir satisfaire également des variations importantes sur ses entrées ; c'est pourquoi le circuit de base comporte quatre entrées et qu'il est possible d'en disposer quatre en parallèle pour former un OU à 16 entrées.

Toutes ces conditions ont été établies par des résultats statistiques obtenus après l'étude de nombreux automates. Pour l'ensemble du domaine défini par ces conditions, le fonctionnement de la cellule doit être correct, ce qui conduit à définir des valeurs aux trois paramètres X, Y et Z des inéquations :

$$\lambda_d > X$$

$$\lambda_m > Y$$

$$\lambda_d - \lambda_m > Z$$

4.2. Etude des retards

Une étude semblable a été effectuée dans [3] . Nous la reprenons ici en tenant compte de toutes les hypothèses suivantes :

- nous éliminons le retard extérieur de la cellule et nous élaborons les entrées primaires avec une bascule RS (front de montée toujours en retard sur le front de descente).
- les temps de propagation peuvent être différents pour une même porte NI à plusieurs entrées.

Regardons donc sous quelles conditions sont supprimés les trois aléas d'entrée, de sortie et de continuité. Nous prendrons pour celà les notations suivantes :

- pour le circuit d'entrée k :

  m_k : temps de montée

  d_k : temps de descente.

- pour la CUSA i :

  1ère porte : $m_{1,i,j}$: retard sur le front de montée
  $d_{1,i,j}$: retard sur le front de descente

  2ème porte : $m_{2,i,j}$: retard sur le front de montée
  $d_{2,i,j}$: retard sur le front de descente

  j = 1 pour une entrée interne à la CUSA
  j = 2 pour une entrée venant de l'extérieur

4.2.1. Aléa d'entrée (figure 4.3)

Pour que cet aléa n'apparaisse pas, il faut que le chemin (1) soit plus long que le chemin (2) soit :

$$m_k + d_{2,1,2} + m_{1,2,2} > d_k + m_{2,2,2} + d_{1,2,1}$$

4.2.2. Aléa de sortie (figure 4,4)

Il faut alors que le chemin (3) soit plus long que le chemin (4) soit :

$$d_k + m_{2,2,2} + d_{1,3,2} + m_{2,3,1} > m_k + d_{2,3,2}$$

4.2.3. Aléa de continuité (figure 4.5)

Il faut ici que le chemin (5) soit plus long que le chemin (6) :

$$m_k + d_{2,1,2} > d_k + m_{2,2,2}$$

Pour cet aléa, la porte de sortie n'intervient pas puisque toutes ses entrées sont semblables (mêmes temps de propagation quelque soit l'entrée utilisée).

4.2.4. Conclusions.

Compte tenu que nous avons toujours les deux relations :

$$m_k > d_k$$

$$d_{1,i,j} > m_{1,i,j}$$

la condition sur l'aléa de continuité est toujours vérifiée et les deux premières le seront d'autant mieux que nous aurons :

$$d_{1,i,j} > d_{2,i,j}$$

$$m_{1,i,j} > m_{2,i,j}$$

(première porte plus lente que la seconde)

Ainsi, dans des conditions normales de fonctionnement, nous n'avons aucun risque d'aléa. Malheureusement, il faut tenir compte de toutes les conditions définies au paragraphe antérieur si bien que pour avoir une marge de sécurité suffisante, (il faut faire intervenir également les variations sensibles des paramètres technologiques lors de la fabrication) nous avons à combiner au mieux les diverses valeurs de $m_{1,i,j}$ et $d_{1,i,j}$.

Ceci ne pouvant être effectué directement par des mesures sur des modèles réels, nous avons utilisé la simulation sur gros calculateur.

4.3. Simulation et résultats

4.3.1. Programme de simulation. [annexe 1]

Le nombre de paramètres de notre problème étant important, le nombre de passages en machine du programme sera également élevé. Pour cette raison, nous avons mis au point un programme de simulation qui, tout en donnant des résultats précis et une facilité d'emploi, garde comme objectif principal la rapidité de calcul.

Ce programme est écrit en fortran 4 pour IBM 360.

Le module de calcul élémentaire correspond à une porte NI à 1, 2 ou 4 entrées, ce qui donne un programme relativement spécialisé mais très bien adapté à notre problème, celui-ci étant composé uniquement de portes semblables disposées en série ou bouclées.

Le modèle de T.MOS utilisé est celui présenté au chapitre 3.

Les données à rentrer dans le programme sont : les constantes technologiques, les valeurs des sources d'alimentation HT et THT, les valeurs des tensions d'entrée pour le régime continu ainsi que les valeurs de ces mêmes tensions pour chaque changement de pente dans le temps et la description du réseau à étudier porte par porte.

Les tensions de sortie nécessaires sont disponibles sous forme de tableaux de valeurs ou de courbes.

L'organigramme général est donné par la figure 4.6 ; son fonctionnement est le suivant :

. à partir des constantes technologiques, nous calculons toutes les grandeurs technologiques (subroutine TECHNO)
. par itérations successives dans le cas où le circuit présente des boucles, nous effectuons le calcul du régime continu (subroutines CONOR, MOS et TEST).
. nous commençons ensuite le calcul du régime transitoire. Celui-ci s'effectue pas à pas, l'incrément de temps DT pouvant varier continument en fonction de certains critères : valant 1 ns à l'origine, il est divisé par deux si les incréments de tension d'entrée sont supérieurs à 100 mV ou si ceux de sortie sont supérieurs à 400 mV ; par contre il est multiplié par trois si la variation des tensions de sortie est inférieure à 15 mV/ns entre deux pas de calcul consécutifs.

Au temps T, les tensions de chaque porte sont connues ainsi que l'incrément de temps DT et les incréments des tensions d'entrée DV5 et DV6 (se rapporter à la figure 4.7 pour un NI à deux entrées).

Les équations aux temps T et T + DT sont les suivantes:

$$\cdot\ IT1\ (V4) = IT2\ (V4, V5) + IT3\ (V4, V6) + IT4\ (V4)$$

$$\cdot\ IT1 + \frac{dIT1}{dV4}\ DV4 = IT2 + \frac{\partial IT2}{\partial V4}\ DV4 + \frac{\partial IT2}{\partial V5}\ DV5 + IT3 + \frac{\partial IT3}{\partial V4}\ DV4 + \frac{\partial IT3}{\partial V6}\ DV6 + CS\frac{DV4}{DT}$$

Cette équation aux dérivées partielles conduit à la détermination de DV4, variation de tension en sortie.

A la fin du pas de calcul, nous connaissons les nouvelles valeurs de toutes les tensions de sortie. DT a une grande importance puisque de lui dépend la précision du calcul et sa rapidité.

4.3.2. Circuit simulé.

Pour avoir des temps de calcul raisonnables, il faut que le circuit à simuler soit le plus petit possible.

Les trois aléas peuvent être étudiés sur un ensemble de trois cellules pour une transition 0 vers 1 d'une entrée e_k. Mais si nous faisons deux transitions consécutives de e_k, il suffit alors de disposer de deux cellules. Si en plus, nous voulons connaître tous les fronts de montée et de descente de chacune des deux portes de la cellule, il nous faut effectuer trois transitions consécutives de e_k sur les deux cellules la première étant une CUSA source.

A ces deux cellules nous associons alors un circuit d'entrée et un circuit de sortie pour former le circuit de simulation complet, tel qu'il est donné sur la figure 4.8 avec l'allure générale des signaux correspondants.

Afin de rendre efficace cette simulation, il est très intéressant de connaître les cas de fonctionnement dans lesquels nous avons le plus de risques de nous trouver en présence d'un aléa.

- Pour l'aléa d'entrée ou de continuité, le plus mauvais cas se présente quand une cellule doublée (deux CUSA mises en parallèle) dont la sortance est maximum est attaquée par la descente du signal de la cellule ascendante possédant une sortance minimum. Le front de descente risque d'être trop rapide pour la cellule qui ne pourra atteindre son niveau 1.

- Pour l'aléa de sortie, le plus mauvais cas est celui où l'entrée primaire de la cellule monte lentement pour bloquer la sortie de la CUSA au niveau 0. Une montée rapide du niveau 1 de la CUSA ascendante peut alors provoquer un niveau 1 momentané mais parasite sur la cellule considérée.

Après chaque passage, les valeurs des paramètres sont modifiées de façon à assurer un fonctionnement correct, même dans les cas extrêmes, sans oublier en outre d'autres grandeurs telles qu'une puissance réduite, un niveau 0 bas, des dimensions géométriques raisonnables ....

Dans cette simulation, nous avons également tenu compte de la disposition générale de chacun des circuits du réseau intégré à grande échelle (celle qui sera donnée au chapitre suivant), principalement pour les capacités parasites qu'elle entraîne.

4.3.3. Résultats de simulation.

Pour la configuration retenue, la simulation donne les courbes de la figure 4.9.

Nous en déduisons que l'aléa d'entrée ne risque jamais de se produire ; par contre, nous sommes quelquefois à la limite pour l'aléa de sortie (en restant néanmoins en dessous de la tension de seuil, ce qui interdit le basculement).

Pour chaque circuit, les caractéristiques générales sont les suivantes :

4.3.3.1. Circuit d'entrée.

. Cas d'une sortance minimum et entrée à fronts raides

pour e'_p	temps de montée	: m = 61 ns
	temps de descente	: d = 22 ns
	courant maximum	: I_{max} = 0,33 mA
	niveau 0	: U_o = 0,8 V

pour e_p	m	= 64 ns
	d	= 39 ns
	I_{max}	= 0,4 mA
	U_o	= 0,8 V

. Cas d'une sortance maximum et entrée à fronts raides.

e'_p	m	= 88 ns	e_p	m	= 84 ns
	d	= 29 ns		d	= 52 ns

les autres caractéristiques ne changeant pas.

4.3.3.2. Cellule universelle.

. Sortie de la CUSA

pour la sortance minimum	m	= 42 ns
	d	= 70 ns
	U_o	= 0,9 V
	I_{max}	= 0,38 mA

Quand la sortance augmente, il faut ajouter 1,8 ns au temps de montée et 1 ns au temps de descente par unité supplémentaire, si bien que la marge de sécurité entre m et d, importante pour la sortance minimum, tend à diminuer quand celle-ci croît.

Dans le cas où deux cellules sont mises en parallèle, m et d étant considérablement augmentés, il est préférable qu'elles aient une sortance faible.

. Sortie intermédiaire de la CUSA.

Sa sortance reste constante et elle est caractérisée par :

$$\begin{cases} m & = 101 \text{ ns} \\ d & = 98 \text{ ns} \\ P_{max} & = 2{,}8 \text{ mW} \end{cases}$$

Les aléas sont éliminés par le grand écart existant entre les temps de montée et de descente, ainsi que par la relative lenteur de la porte intermédiaire.

Lors de la mise sous tension, la sortie de la CUSA doit se positionner au niveau 0. En raison des variations de la sortance, ce n'est pas toujours possible, si bien que nous avons été contraint à ajouter une entrée de mise en conditions initiales pour être sûr du bon fonctionnement.

Le schéma complet de la CUSA est alors celui de la figure 4.10.

4.3.3.3. Circuit de sortie

Ce circuit est formé de deux portes, comme l'indique la figure 4.11.

. La première porte à quatre entrées peut devenir à 8, 12 ou 16 entrées par regroupement simple de 2, 3 ou 4 d'entre elles. Pour elle, le problème de l'aléa de continuité ne se pose plus, puisqu'il a été résolu au niveau de la CUSA.

Ses caractéristiques sont :

m	= 41 ns	pour une entrée à fronts raides
d	= 20 ns	
U_o	= 1,2 V	
I_{max}	= 200 µA	

. Le buffer de sortie pouvant êtee chargé par une capacité extérieure CS = 10 pF

m	= 90 ns
d	= 65 ns
U_o	= 1 V
P_{max}	= 20 mW

m = d = 50 ns pour CS = 1 pF

4.4. Résultats expérimentaux et comparaison

Les résultats expérimentaux sont ceux que nous obtenons sur la réalisation à grande échelle décrite au chapitre suivant. Ayant accès uniquement aux entrées et aux sorties de l'automate, les mesures ne sont pas toutes possibles ; nous avons obtenu toutefois un fonctionnement sans aléa.

Du point de vue statique, le niveau 0 pour le buffer de sortie est 1,1 V (1 V par simulation) et la consommation moyenne du circuit comprise entre 22 et 26 mA (24 mA par simulation) pour HT = 12 V et THT = 24 V.

Du point de vue dynamique, nous avons enregistré la courbe de réponse d'une sortie résultante de la variation en créneau d'une entrée. La comparaison avec la courbe théorique tracée dans les mêmes conditions de fonctionnement est donnée sur la figure 4.12.

En conclusion, nous pouvons dire que pour toutes les caractéristiques, les valeurs expérimentales et simulées correspondent à 10 % près.

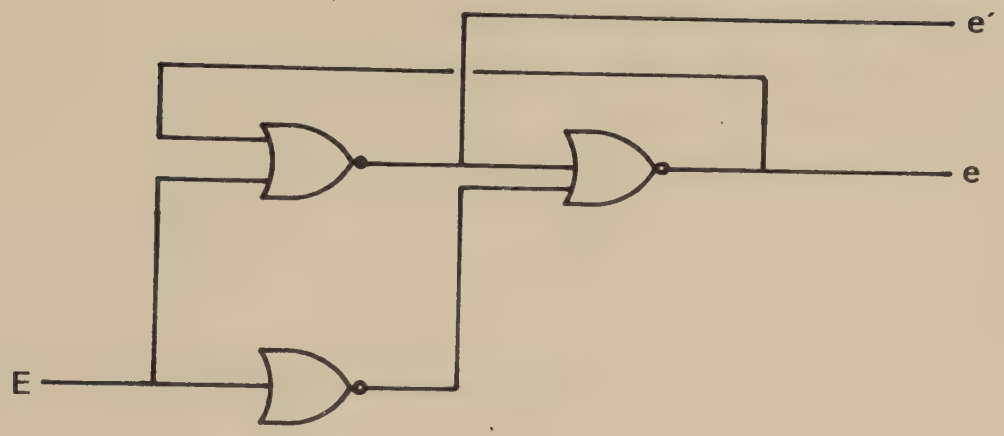


Figure 4.1. circuit d'entrée

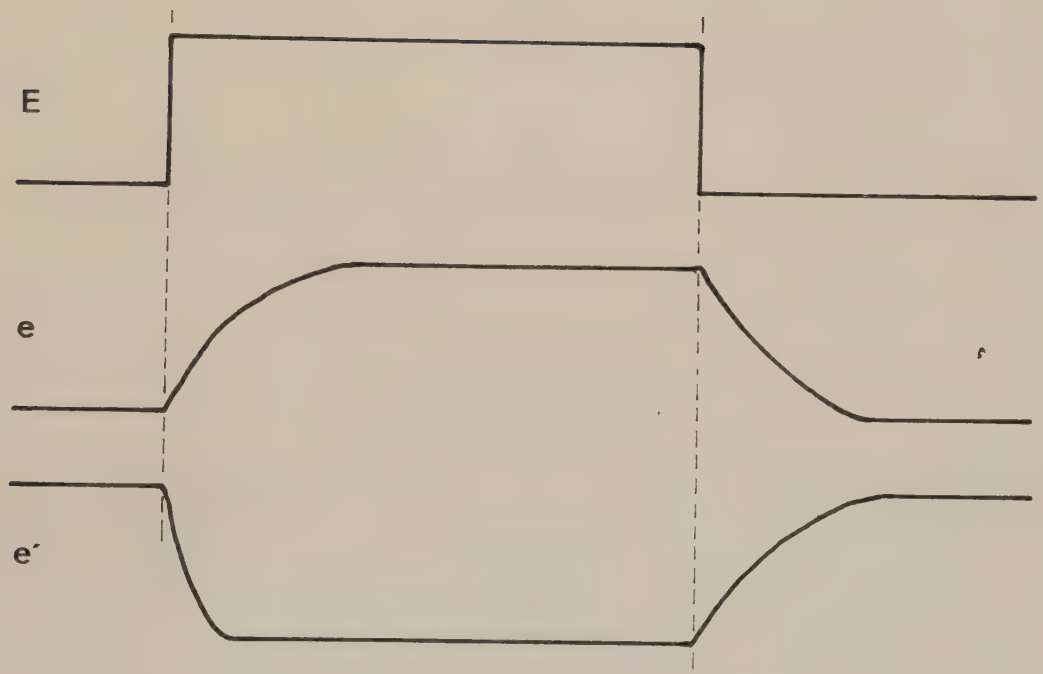


Figure 4.2. caractéristiques du c. e.

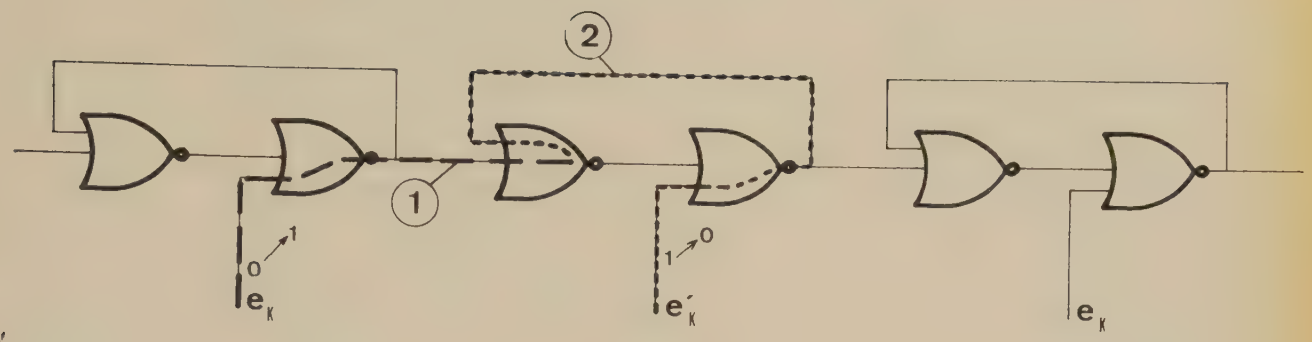


Figure 4.3. aléa d'entrée

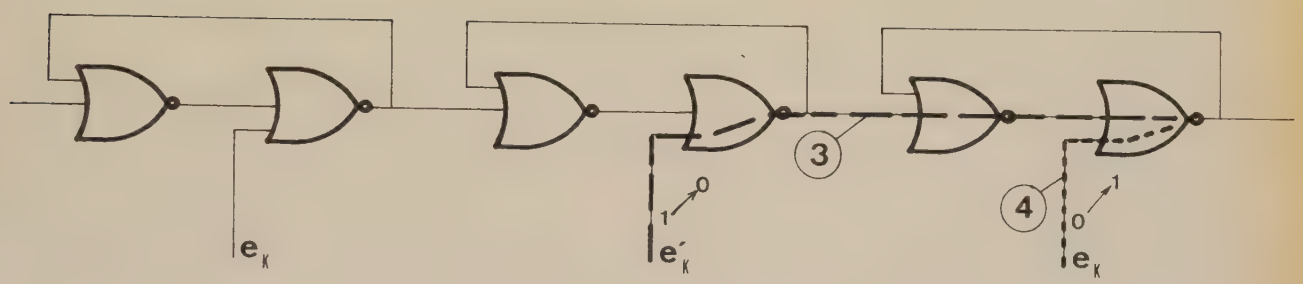


Figure 4.4. aléa de sortie

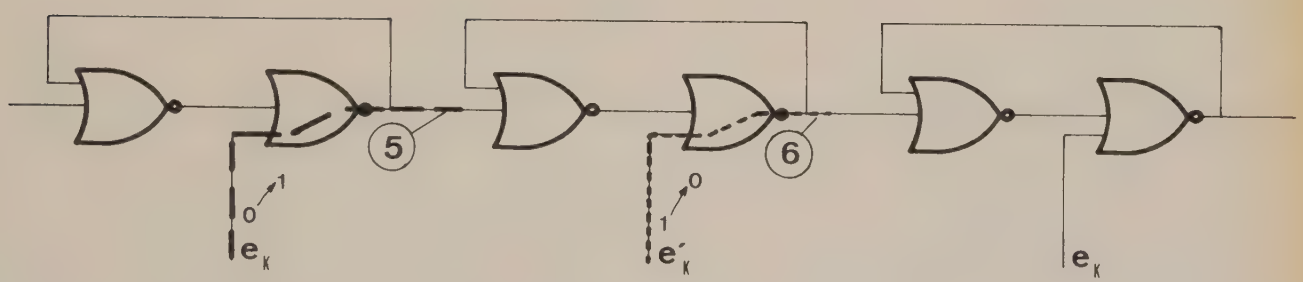


Figure 4.5. aléa de continuité

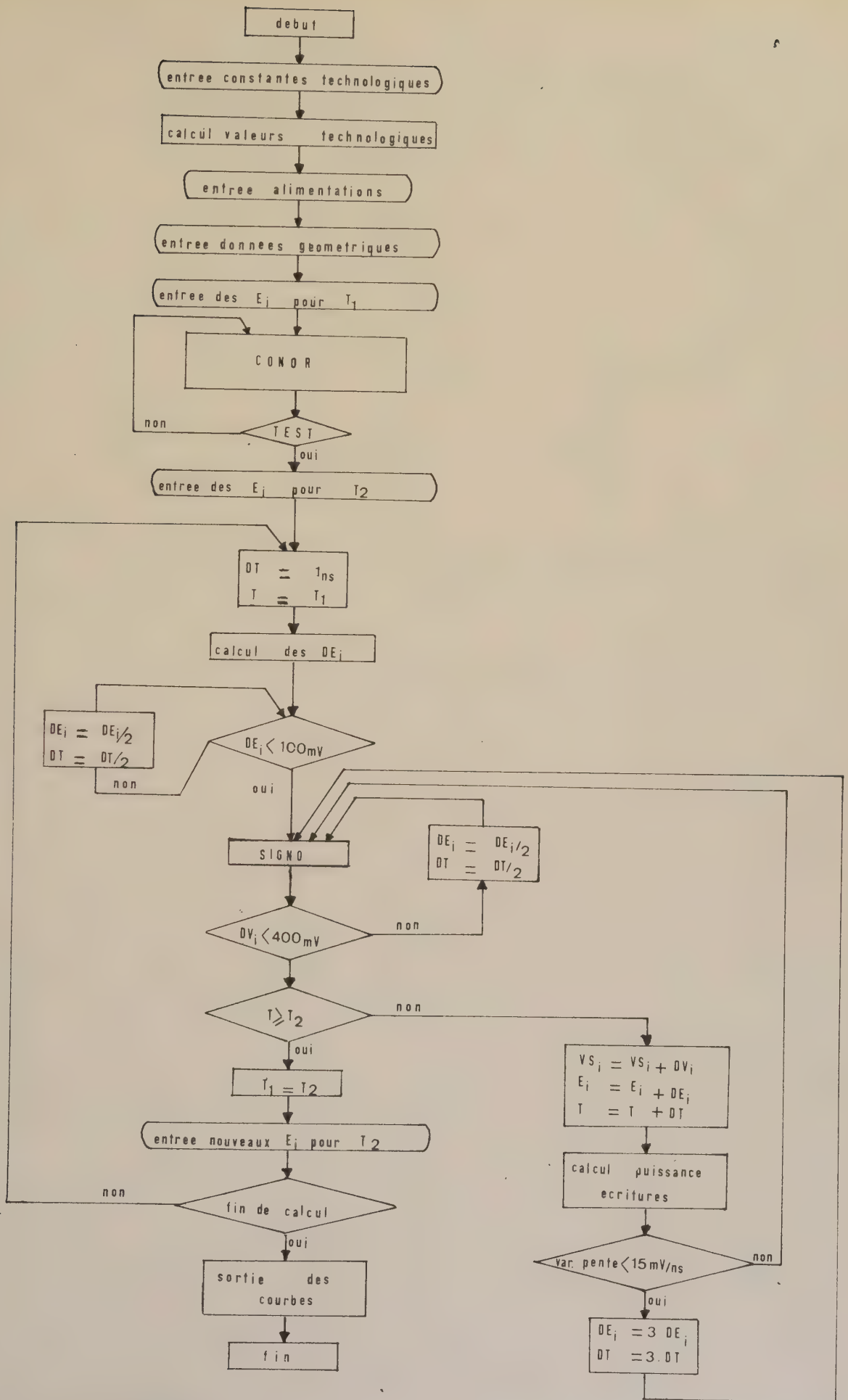

debut
entree constantes technologiques
calcul valeurs technologiques
entree alimentations
entree donnees geometriques
entree des Ej pour T1
CONOR
non
TEST
oui
entree des Ej pour T2
DT = 1ns
T = T1
calcul des DEi
DEi = DEi/2
DT = DT/2
DEi < 100mV
non
oui
SIGNO
DEi = DEi/2
DT = DT/2
DVi < 400mV
non
T ≥ T2
non
oui
T1 = T2
entree nouveaux Ej pour T2
non
fin de calcul
oui
sortie des courbes
fin
VSi = VSi + DVi
Ei = Ei + DEi
T = T + DT
calcul puissance ecritures
var. pente < 15mV/ns
non
oui
DEi = 3 DEi
DT = 3.DT

Fig 4.6.

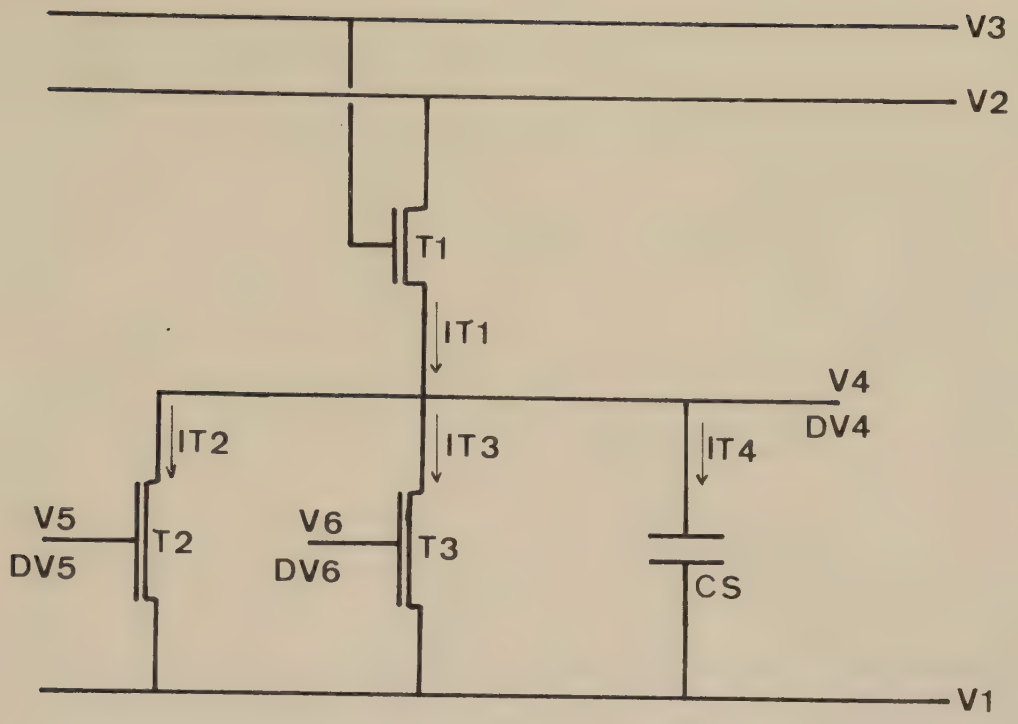


Fig 4.7. calcul de DV4

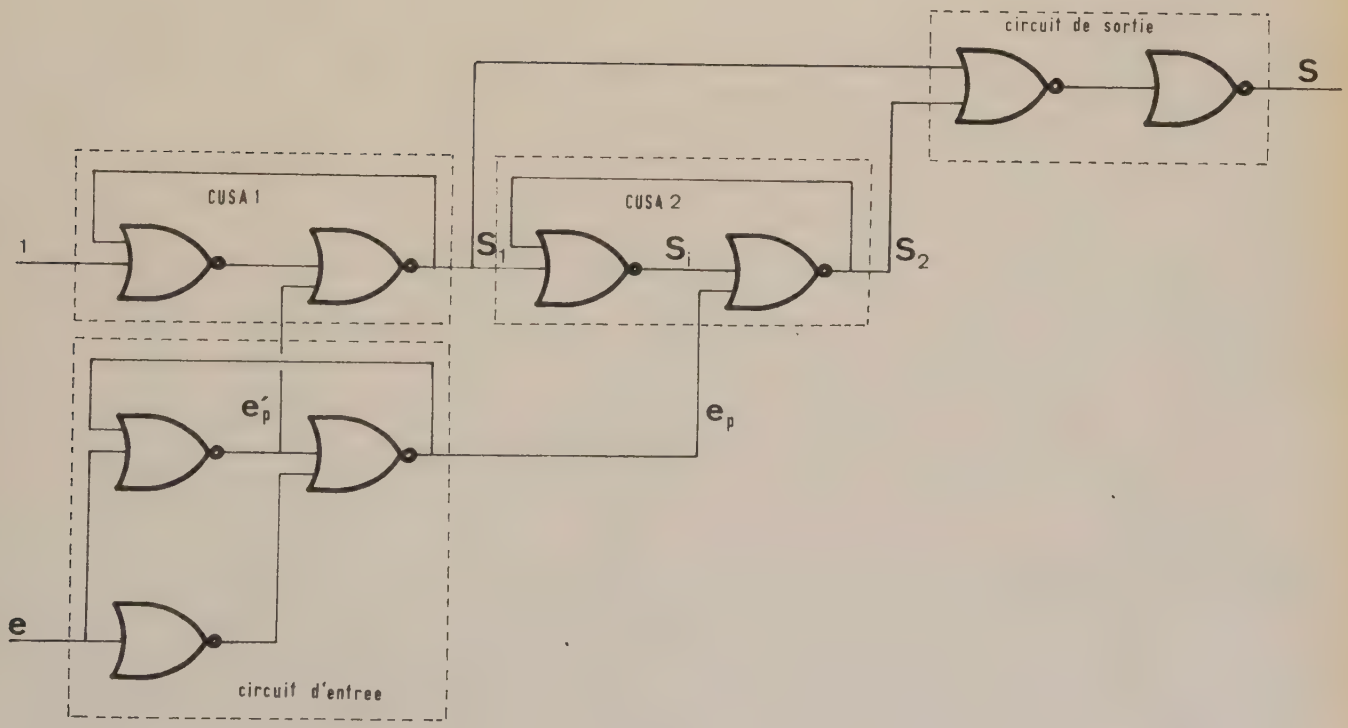


Fig 4.8.1. circuit simulé

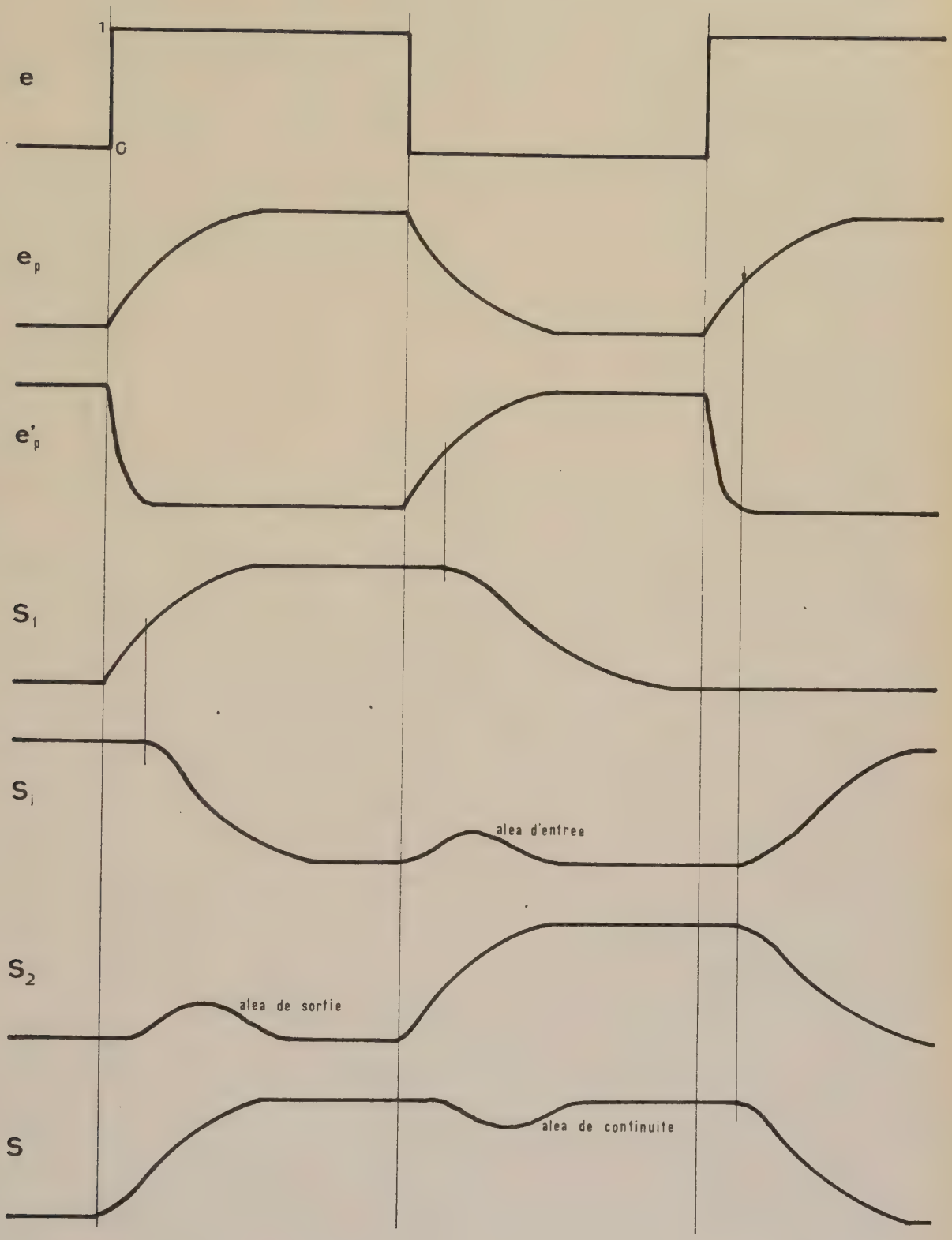


Fig 4.8.2. diagramme des temps

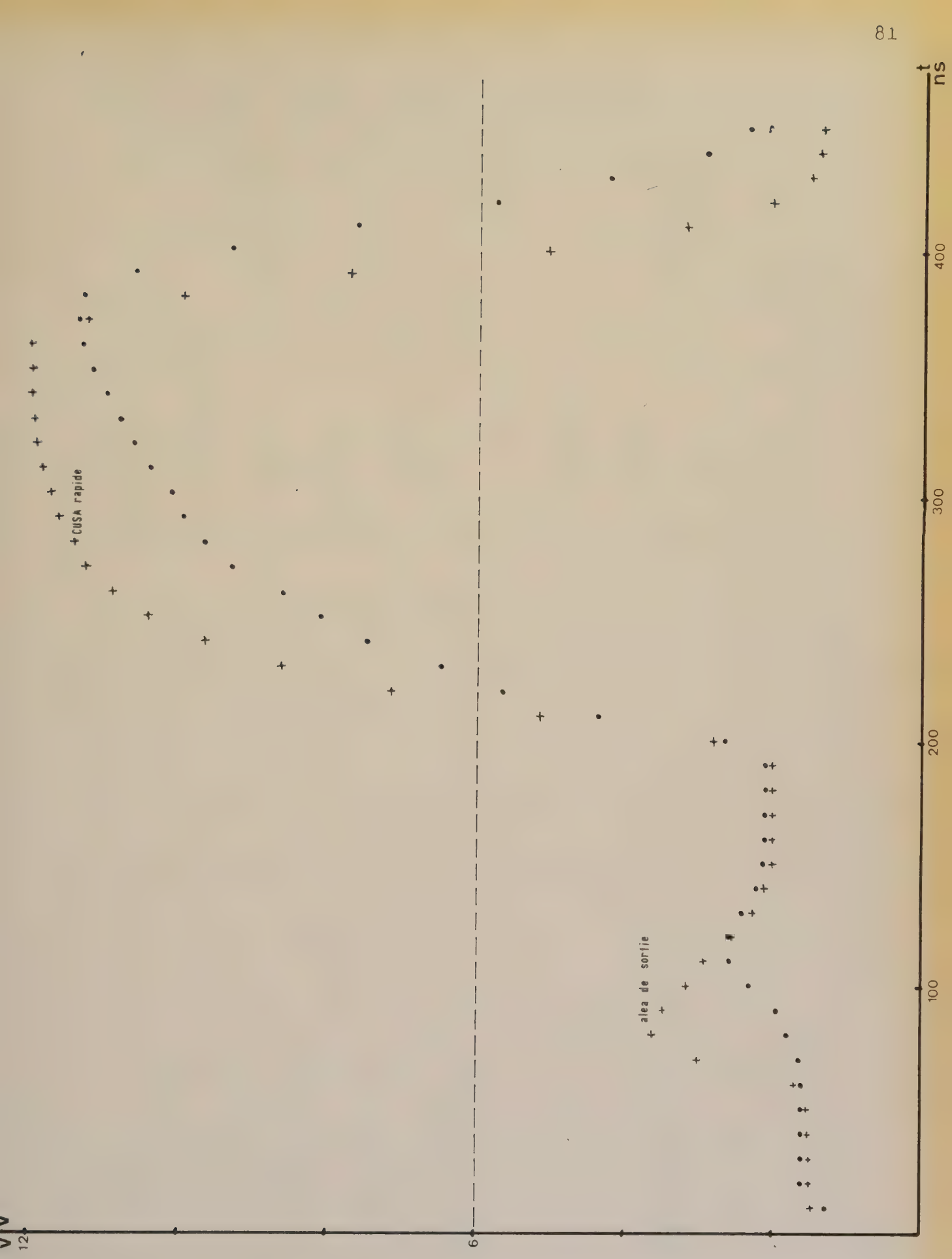


Fig 4.9. resultats de simulation S_2

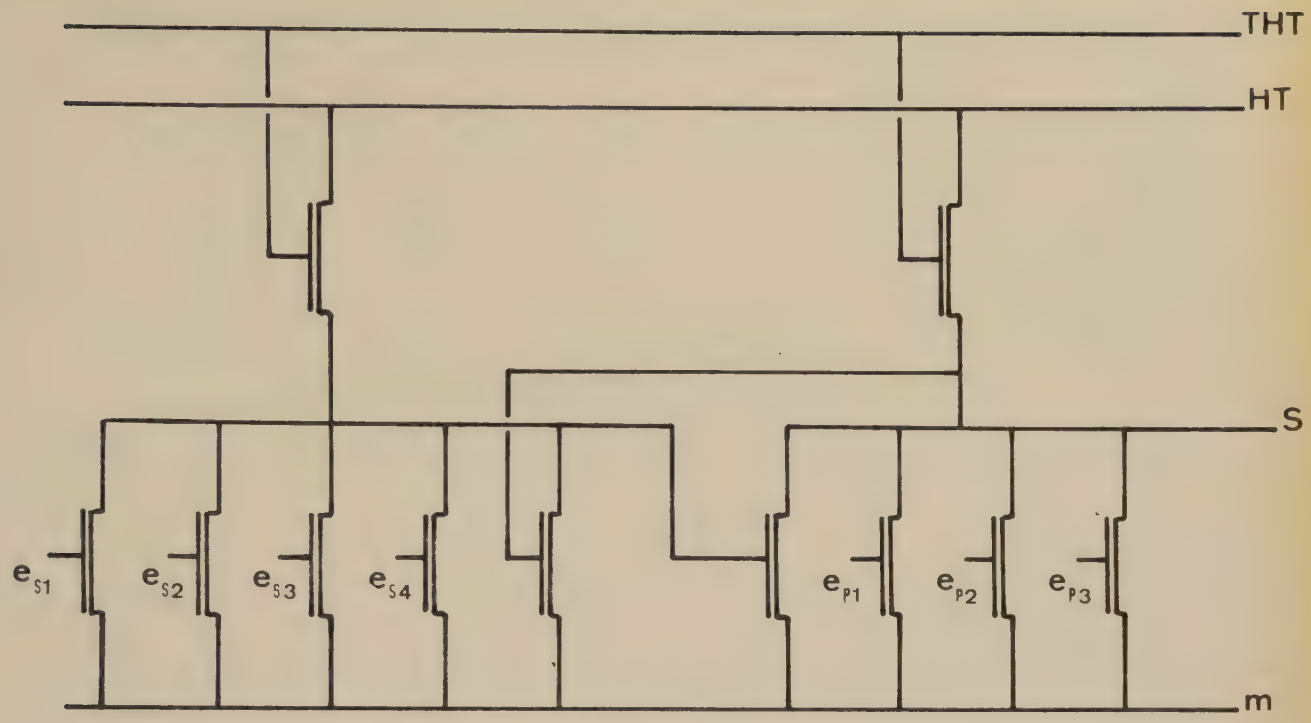


Figure 4.10. CUSA

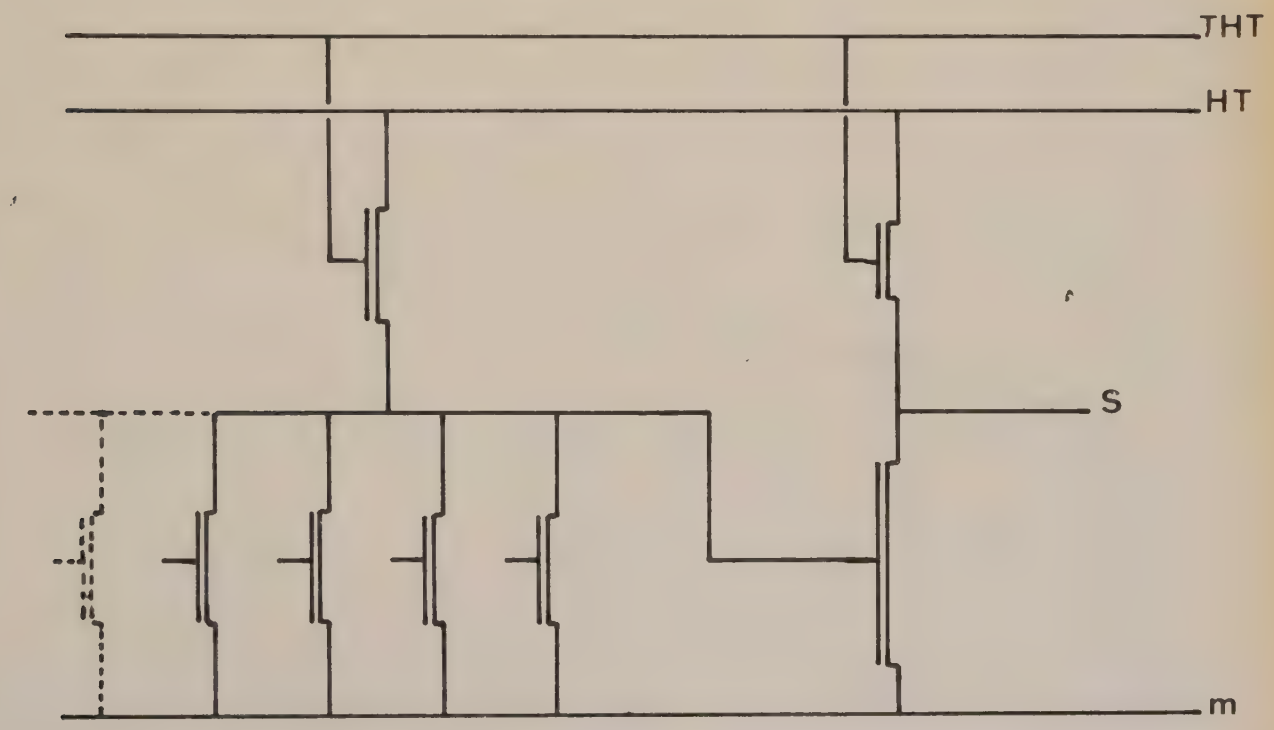


Figure 4.11. circuit de sortie

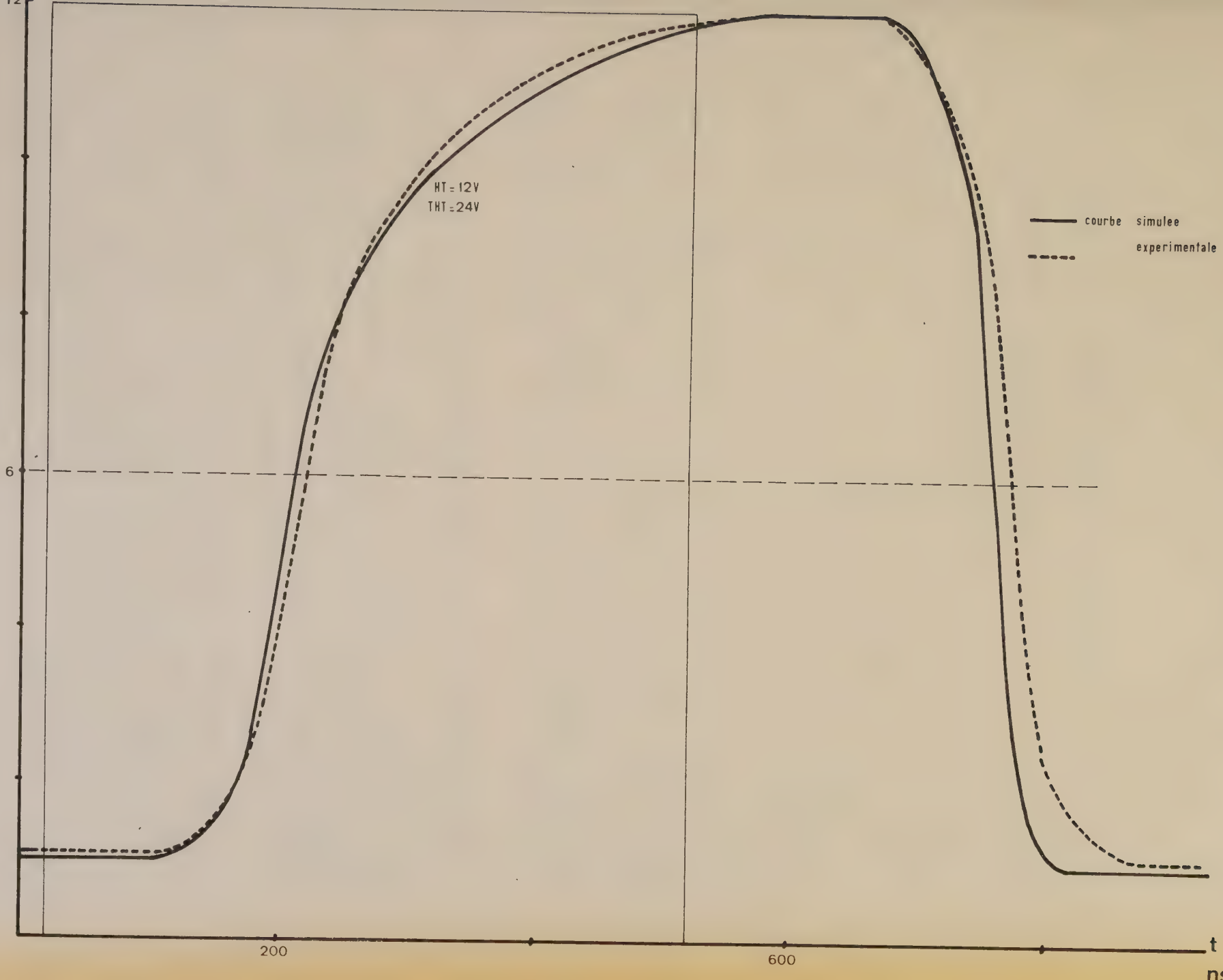


Fig 4.12.

5. DESCRIPTION DU RESEAU INTEGRE DE CELLULES

5.1. Description générale du réseau

Après avoir examiné séparément la cellule universelle, le circuit d'entrée et le circuit de sortie associés, nous allons donner la manière dont ils s'imbriquent les uns dans les autres dans une configuration intégrée à grande échelle. Son originalité principale est qu'elle est fondée sur un cablage à la demande d'un réseau figé au niveau du positionnement des cellules par rapport aux circuits annexes.

Dans cette optique, chaque ensemble ou puce présente le même nombre de cellules et de circuits annexes en des positions bien définies. Seul le masque de métallisation, représentatif des interconnexions entre éléments, spécifie l'automate que nous voulons intégrer. Ceci est particulièrement intéressant pour réaliser en petites séries des systèmes différents les uns des autres.

Le tracé des masques s'est ainsi effectué en deux étapes : [annexe 2] :

- La première consiste à décrire le réseau fixe ainsi que les fils d'alimentation, manuellement, rectangle par rectangle car aucune aide systématique par calculateur n'étant opérationnelle pour cette partie.

- La seconde, consacrée aux diverses interconnexions, est entièrement traitée par calculateur à partir de la lecture du tableau d'états simplifié ou du graphe fonctionnel du système que l'on veut réaliser (utilisation du programme ESPACE du LETI faisant intervenir tous les paramètres de la technologie M.O.S.).

Sur la puce, les trois circuits principaux (circuit d'entrée, CUSA avec entrées primaires puis entrées secondaires et circuit de sortie) sont disposés les uns au-dessous des autres comme l'indique la vue d'ensemble de la figure 5.1. Nous y avons représenté aussi les divers plots d'entrée et de sortie, ainsi que les lignes d'alimentation (masse, HT, THT). Pour faciliter les interconnexions (métallisations horizontales), les diffusions (lignes verticales) de certaines portes sont imbriquées dans les circuits voisins jusqu'à l'endroit où elles sont nécessaires. Pour ces interconnexions spécifiques sur trois niveaux (entrées primaires, entrées secondaires et sorties), un espace suffisant a préalablement été réservé pour permettre leur passage. A cette occasion, l'étude statistique des automates nous a permis de choisir ces espaces au mieux des possibilités (la puce devant satisfaire des contraintes de superficie pour être réalisable).

Pour plus de détails, les trois circuits sont représentés sur les figures 5.2, 5.3 et 5.4.

Le circuit d'entrée est le seul circuit qui ne subisse pas de variations avec les réalisations puisqu'il reste identique quelque soit l'automate. Nous notons au-dessus de lui le circuit de protection, composé d'un MOS épais suivi d'une résistance diffusée, puis d'une diode Zener, ce qui évite les surtensions dangereuses pour les grilles des transistors de commande.

La CUSA est par contre le circuit le plus simple dans sa forme de base puisque ne comprenant que deux transistors de charge, deux transistors de commande pour le bouclage et un troisième pour la mise en condition initiale. La longueur importante de la diffusion de sortie accentue la dissymétrie entre les deux portes dans le mauvais sens ; en effet, cette diffusion introduit une capacité parasite

supplémentaire diminuant les performances dynamiques de la porte de sortie, ce que nous devons compenser en jouant sur les paramètres géométriques de la porte intermédiaire qui elle, possède une diffusion de taille plus modeste.

Le circuit de sortie est caractéristique par son buffer de grandes dimensions et la possibilité de mise en parallèle de quatre portes par suppression de un à trois transistors de charge et jonction des drains diffusés correspondants.

5.2. Caractéristiques de la puce

Pour définir complétement la puce, il faut donner d'une part ses caractéristiques technologiques et d'autre part la description exacte des éléments qui la composent.

5.2.1. Caractéristiques technologiques

Les puces sont fabriquées sur du silicium type n (2 Ω.cm) à orientation cristalline <1, 1, 1> .

- épaisseur oxyde fin X_o = 0,1 µ
- largeur de diffusion : 7 µ
- profondeur de diffusion : 3 µ
- intervalle séparant deux diffusions : 17 µ
- largeur de métallisation : 10 µ
- intervalle séparant deux métallisations : 10 µ
- dimensions des plots de sortie : 80 x 80 µ
- haute tension : HT = 12 V
- très haute tension : THT = 24 V

5.2.2. Caractéristiques topographiques

Les caractéristiques topographiques de la puce, dont la vue d'ensemble est donnée à la figure 5.1 sont les suivantes :

. dimensions : 2200 x 2300 µ , soit une surface de 5 mm^2

Le nombre maximum de transistors est 700, celui de prises de contacts 500.

. dispositifs de haut en bas :

- 15 plots d'entrée et un plot de RAZ.
- 15 circuits d'entrée avec circuits de sécurité
  sortance variable de 1 à 18
- 30 cellules universelles
  sortance variable de 1 à 18
  3 entrées primaires avec 12 passages de connexions
  une mise en conditions initiales
  4 entrées secondaires avec 10 passages de connexions
  possibilité de mettre deux cellules en parallèle par suppression de deux transistors de charge sur les quatre.
- 30 circuits de sortie
  4 entrées
  15 passages de connexions
  possibilité de mettre quatre circuits en parallèle pour avoir une entrance de 16
- 10 buffers de sortie
  possibilité de charger une capacité extérieure
  CS = 10 pF
- 10 plots de sortie et 3 plots d'alimentation
  (HT, THT et masse).

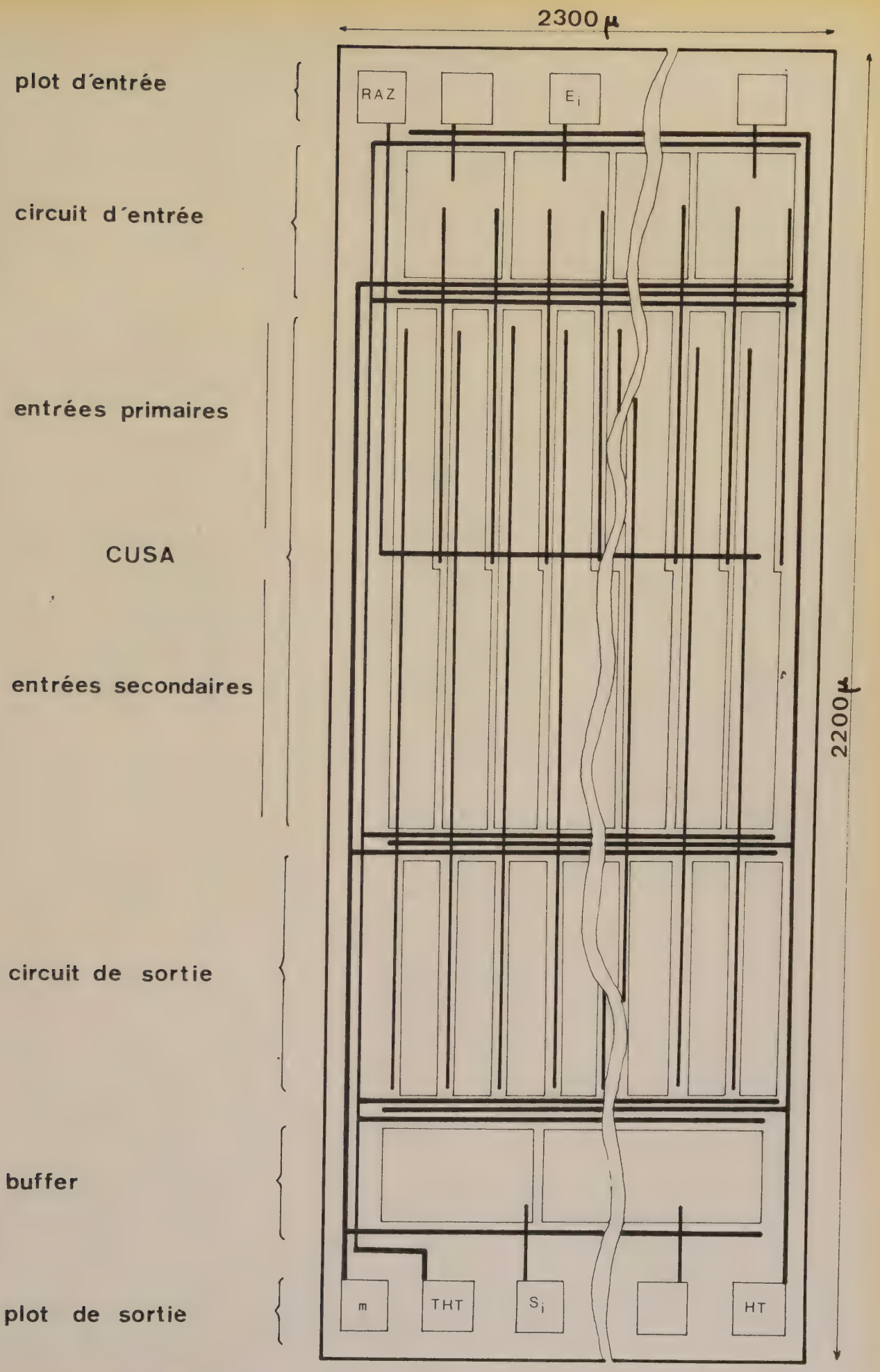

2300 µ
plot d'entrée
circuit d'entrée
entrées primaires
CUSA
entrées secondaires
circuit de sortie
buffer
plot de sortie
RAZ
E_i
2200 µ
m
THT
S_i
HT

Fig 5. 1.

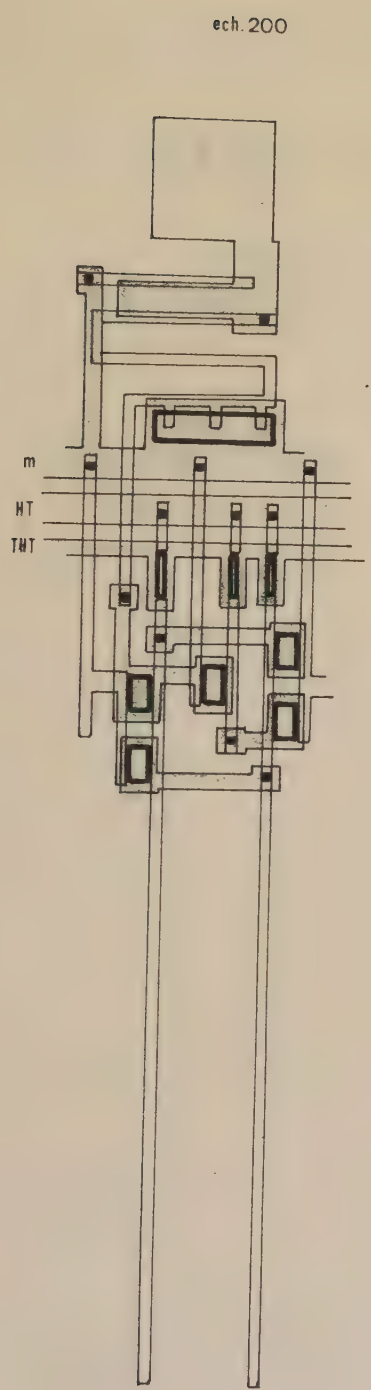
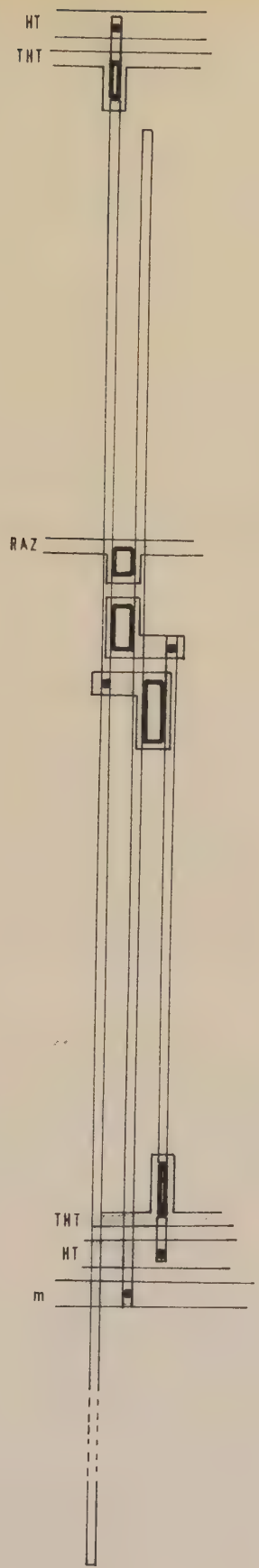


Fig 5.2. c.e.



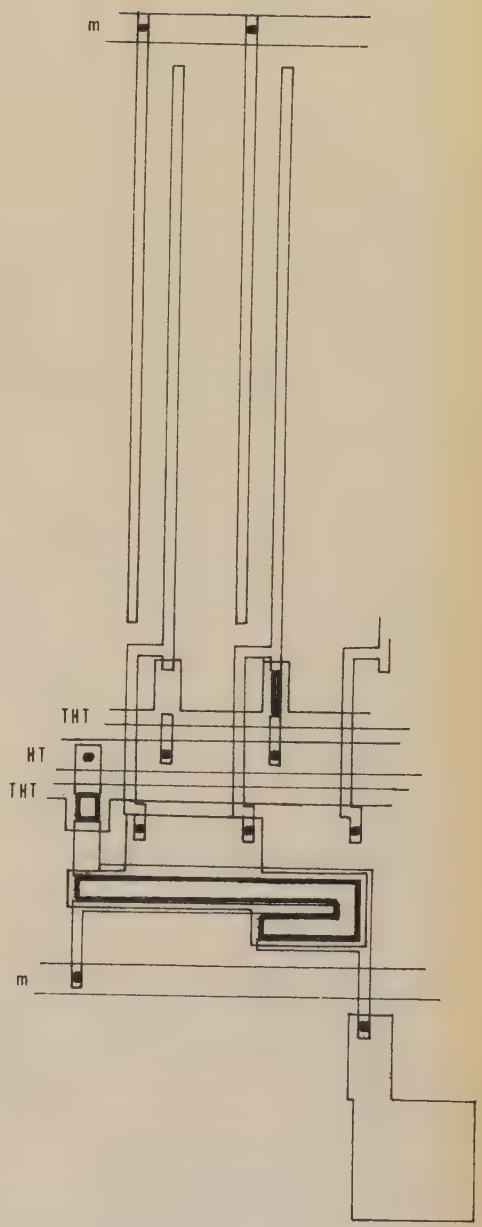


Fig 5.4. c.s.

Fig 5.3. CUSA

6. APPLICATION [14]

6.1. Description du réseau cablé

Après avoir donné les caractéristiques technologiques et topographiques de la puce, nous allons montrer ses possibilités d'intégration en décrivant le premier système qui a été réalisé sur ce réseau, une vue d'ensemble étant donnée par la photographie de la figure 6.1.

Ce système comporte trois automates totalement indépendants au niveau du réseau de cellules (ils le sont un peu moins au niveau des entrées-sorties pour permettre un rendement le plus élevé possible et un test sur pointes plus aisé pour cette première réalisation) : le premier est la porte avec mémoire définie par son tableau d'états, le second un registre à décalage dans les deux sens, à trois étages bouclés, défini de façon intuitive et le troisième un gros automate industriel défini par son graphe.

Il est intéressant d'avoir groupé sur une même puce trois automates définis de façon différente, automates que nous allons étudier séparément maintenant.

6.1.1. Porte avec mémoire

C'est le petit système à deux entrées e_1 et e_2 et une sortie S défini par son tableau d'états primitif dont l'étude détaillée est effectuée au chapitre 1.

Pour son cablage, il demande finalement 2 CUSA et un OU à deux entrées.

Sur la figure 6.2 représentant l'ensemble des interconnexions du système cablé, la porte avec mémoire a

pour entrées e_1 et e_2 respectivement les plots E7 et E8 et pour sortie S, le plot S8. Les CUSA utilisées sont les deux dernières (numéros 29 et 30).

6.1.2. Registre à décalage dans les deux sens.

Commençons par décrire le registre à décalage à droite : c'est un circuit itératif dont chaque étage peut être réalisé avec deux cellules en série en considérant la grandeur à décaler comme une entrée de mise en condition initiale et l'impulsion d de commande comme une entrée primaire. Si $S_{n-1} = 1$ pendant l'impulsion d, S_n passe à 1 après cette impulsion, sinon si $S_{n-1} = 0$, S_n reste aussi à 0 après l'impulsion (voir figure 6.3).

Pour transformer ce registre en registre à décalage dans les deux sens avec l'hypothèse que les impulsions g et d ne se chevauchent jamais, il suffit de relier S_{n+1} à S_n comme S_{n-1} l'est à S_n. Nous obtenons alors le réseau de la figure 6.4 avec le diagramme des temps correspondants.

Le registre qui a été câblé sur la puce comprend trois étages bouclés sur eux-mêmes comme l'indique la figure 6.5. Il est représenté par les CUSA 20, 21 ... 28. Les entrées d et g sont respectivement les entrées E7 et E8. La sortie de ce registre est parallèle : aux étages 1, 2 et 3 correspondent respectivement les sorties 55, 56 et 57. Les deux mises en conditions initiales sont assurées par les sorties des deux CUSA sources 1 et 9.

6.1.3. Automate industriel de distribution et travail en parallèle sur deux postes [11]

Cet automate est plus complexe que celui opérant le transfert de paquets, mais nous allons le traiter également

par la méthode des graphes exposée au chapitre 2.

La description de ce dernier est donnée schématiquement par la figure 6.6.

Deux postes de travail identiques A et B sont alimentés en pièces brutes arrivant sur le tapis T1. Les pièces travaillées sont évacuées par le tapis T2. Le transport des pièces de T1 aux postes de travail et de ces postes à T2 est réalisé par deux pinces P1 et P2 solidaires, disposées à 90° l'une par rapport à l'autre et se déplaçant au-dessus des postes de travail.

Le fonctionnement de cet ensemble est le suivant : considérons la position α comme position de départ avec les pinces ouvertes, ce qui correspond exactement à l'état a du graphe des transitions de la figure 6.7 ; dans cet état, une pièce brute vient d'être déposée en A pour y être travaillée et une pièce terminée par ce même poste A vient d'être déposée sur le tapis T2 si bien que le poste B travaille seul. Lorsque la pièce ne se trouve plus en tête de T2, le moteur de rotation des pinces vers la gauche se met en marche ainsi que le poste de travail A. Les pinces ouvertes arrivent alors dans la position β pour laquelle le travail au poste B s'arrête et les deux pinces se ferment. Celles-ci prennent donc la pièce travaillée en B d'une part et une pièce brute se trouvant sur le tapis pourvoyeur T1 d'autre part. Quand les pinces sont bien fermées, elles tournent dans le sens contraire au précédent pour arriver dans la position γ pour laquelle les pinces s'ouvrent et déposent les pièces sur les tapis correspondants.

A ce moment, un demi-cycle est effectué et nous nous trouvons dans l'état n du graphe des transitions. Le demi-cycle suivant est symétrique et nous ramène à l'état initial a.

Cet automate comporte cinq entrées :

e_1 : présence d'une pince au poste de travail A

e_2 : présence d'une pince au poste de travail B

e_3 : présence d'une pièce en tête de tapis T2

e_4 : pinces fermées

e_5 : pinces ouvertes

et six sorties :

S_1 : travail d'une pièce au poste A

S_2 : travail d'une pièce au poste B

S_3 : rotation des pinces dans le sens direct

S_4 : fermeture des pinces

S_5 : rotation des pinces dans le sens rétrograde

S_6 : ouverture des pinces.

La description du fonctionnement de cet automate n'est pas particulièrement aisée par un tableau d'états (qui comporte 32 colonnes pour les états d'entrée et 6 colonnes pour les sorties). Par contre, le graphe de la figure 6.7 peut facilement être construit.

D'après les définitions données au chapitre 2, ce graphe est primitif puisqu'aucune entrée n'est susceptible de varier à l'intérieur même de chaque état. Nous pourrions donc réaliser le cablage directement à partir de ce graphe : aux 26 états seraient associées 26 CUSA. Cependant, nous allons utiliser certaines méthodes qui, dans l'ordre groupement d'états puis recherche d'états sources, vont nous permettre d'obtenir un réseau final plus simple.

. groupement d'états

En appliquant les régles du paragraphe 2.3, nous obtenons les groupements qui sur le graphe primitif sont visualisés par une ligne discontinue.

Certains groupements sont multiples : par exemple, j et k donnent un état jk insensible à e_4 qui, à nouveau groupable avec m, conduit à l'état jkm insensible à e_3 et e_4.

Avec ces groupements, nous arrivons à un graphe de 18 états.

. états sources

Dans le graphe fonctionnel irréductible qui vient d'être défini, chaque état sert à élaborer au moins une sortie et possède au plus deux ascendants si bien qu'il n'est intéressant de trouver des états-sources que pour effectuer des mises en conditions initiales automatiques. Nous allons chercher ici si les conditions sont satisfaites pour les états a et n, états correspondant au commencement de chaque demi-cycle.

Pour celà, nous cherchons les monomes caractéristiques de chaque état afin d'établir le tableau initial de la figure 6.8.1 qui une fois complété donne celui de la figure 6.8.2.

pour a : $M_a = e_1\, e'_2\, e_3\, e'_4\, e_5$

et $M_a \left(\sum_{v \in \Omega a} M_v\right) \equiv 0 \Longrightarrow$ a est source

M_a tel qu'il vient d'être défini est le monome complet. Nous pouvons chercher à le diminuer puisque théoriquement les seules entrées nécessaires pour a sont e_3 et e_5.

Ainsi $M^*_a = e_1 e_3 e_5$ conduit aussi à :

$$M^*_a \left(\sum_{v \in \Omega_a} M_v\right) \equiv 0$$

De la même manière, nous montrons que n est un état source avec pour monome caractéristique $M^*_n = e_2\ e_3\ e_5$.

Nous arrivons ainsi au graphe fonctionnel simplifié de la figure 6.9 auquel correspond le réseau cablé de la figure 6.10.

A cet automate, une entrée e_6 de demande d'arrêt a été ajoutée lors de la réalisation. Sans rien modifier sur le graphe, la commande effective d'arrêt correspondant à la sortie S7 n'intervient que lorsque le système est dans l'un des deux états sources. Ce petit supplément permet l'arrêt seulement à la fin d'un demi-cycle si bien que la mise en condition initiale s'effectue bien automatiquement au démarrage.

Sur la figure 6.2, cet automate occupe les CUSA 1 à 19 ; les entrées e_1 ... e_6 sont respectivement E1, E2, E3, E4, E5, E6 et les sorties S_1 ... S_7 : S3, S4, S6, S5, S2, S1 et S7.

L'ensemble de ces trois automates comportant 600 transistors et 450 prises de contacts est contenu dans un boîtier "flat pack" à 24 pattes comme l'indique le schéma de brochage de la figure 6.11.

6.2. Résultats

Quand les puces sont fabriquées, il est nécessaire de les tester. Cette opération s'effectue en deux temps.

- le premier est un test sur pointes des puces disposées encore les unes à côté des autres sur la pastille de silicium. Au cours de ce test, nous effectuons certaines mesures technologiques ainsi que la vérification du fonctionnement logique.
- le second est un test logique et dynamique des circuits enfermés dans leurs boîtiers.

Nous allons donc étudier les tests logiques et dynamiques ; nous donnerons ensuite quelques chiffres sur les résultats obtenus.

6.2.1. Test logique

Ce test permet de vérifier le bon fonctionnement de la séquence de l'automate.

Il a été effectué sur une machine disponible au LETI sur laquelle les états d'entrée et de sortie sont affichés sur une matrice à diodes comportant 32 états possibles.

Pour chaque état d'entrée, la machine compare l'état de sortie affiché correspondant à celui qui vient du circuit. S'ils sont semblables, la machine passe à l'état d'entrée suivant, sinon elle s'arrête.

Pour notre circuit, la séquence de test a donc été limitée à 32 états (figure 6.12). Malgré l'importance de l'automate, elle permet néanmoins de vérifier le fonctionnement de tous les circuits d'entrée, CUSA et circuits de sortie. Elle

commence par une RAZ des cellules, ce qui est toujours nécessaire pratiquement.

Dans le circuit d'alimentation, un milliampèremètre a été inséré pour vérifier rapidement la consommation moyenne sinon constater un court circuit ou un circuit coupé dans les fils d'alimentation.

6.2.2. Test dynamique.

De par la conception même du circuit intégré à grande échelle, on ne peut avoir accès qu'aux entrées et sorties. C'est pourquoi les essais dynamiques se réduisent au minimum : réponse des sorties aux variations des entrées et modifications en fonction de certains paramètres (capacité de sortie, tension d'alimentation).

Certains résultats ont déjà été donnés au paragraphe 4.4. Sur la figure 6.13 sont représentées quelques courbes montrant l'évolution de la montée et de la descente de la sortie pour différentes valeurs de la capacité de sortie CS. Pour la montée du signal de sortie, on note une croissance de 4,8 ns/pF (elle est de 4 ns/pF par simulation).

Pour la descente, la croissante est de 1,9 ns/pF au lieu de 1,83 ns/pF par simulation.

Il est intéressant aussi de noter les variations de m et d avec les tensions d'alimentation, visualisées sur la figure 6.14.

6.2.3. Résultats généraux

Plusieurs plaquettes contenant chacune 120 puces ont été fabriquées.

Après le test sur pointes, le rendement maximum des circuits bons était de 22 %. Après le montage final, ce rendement est descendu à 11 %.

Nous avons ainsi 18 circuits qui fonctionnent complètement. Sur d'autres puces, nous n'avons qu'un ou deux automates qui fonctionnent sur les trois.

Avec ces circuits, nous avons pu comparer les valeurs expérimentales et théoriques qui correspondent toujours bien.

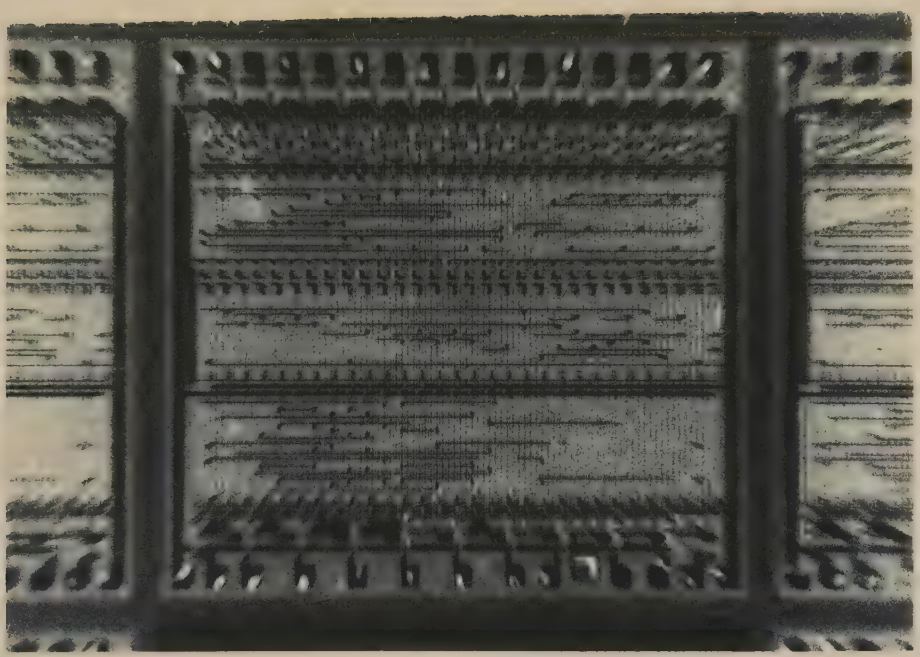
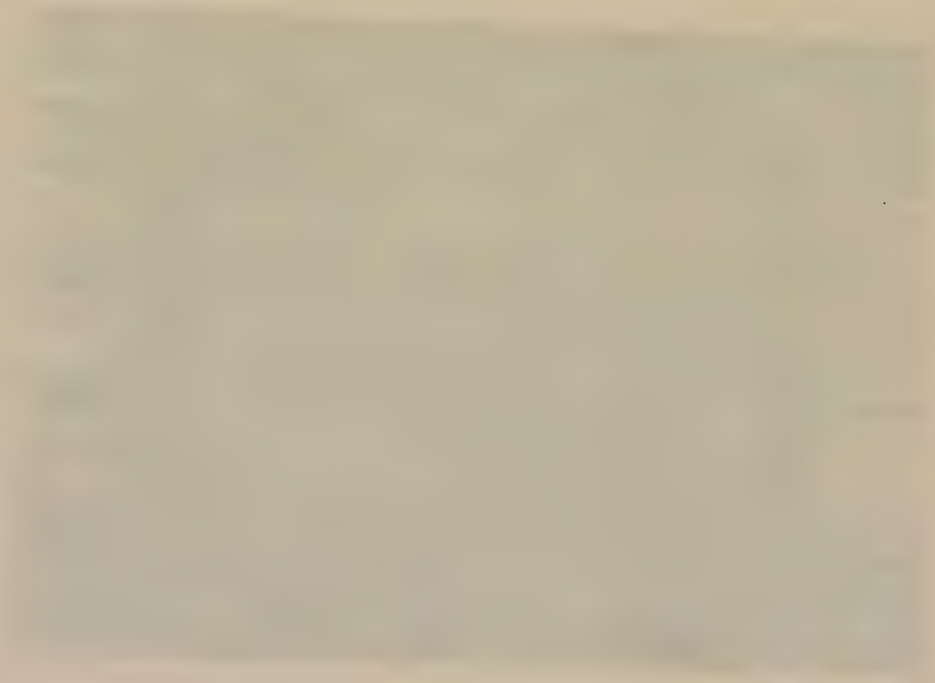


Fig 6.1. vue d'ensemble
de la réalisation



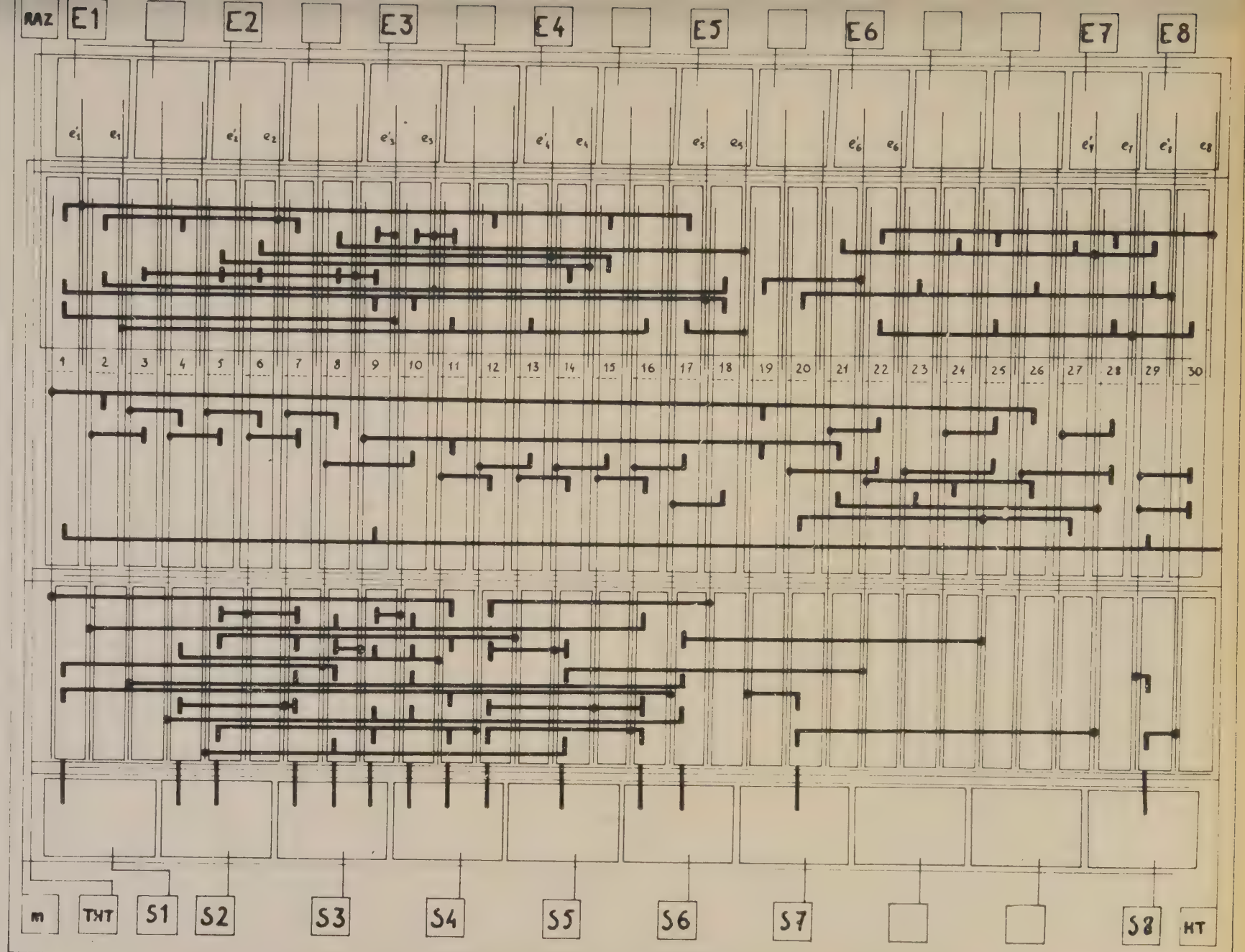


Fig 6.2.

automate industriel : entrees $e_1 \dots e_6 \rightarrow$ E1 ... E6 ; sortie : $s_1 \dots s_7 \rightarrow$ S3, S4, S6, S5, S2, S1, S7 ; CUSA 1 ... 19
porte avec mémoire : " $e_1, e_2 \rightarrow$ E7, E8 ; " $s \rightarrow$ S8 ; " 29, 30
registre à décalage : " d, g $\rightarrow$ E7, E8 ; " $s_1, s_2, s_3 \rightarrow$ S5, S6, S7 ; " 20 ... 25 (à utiliser seul)

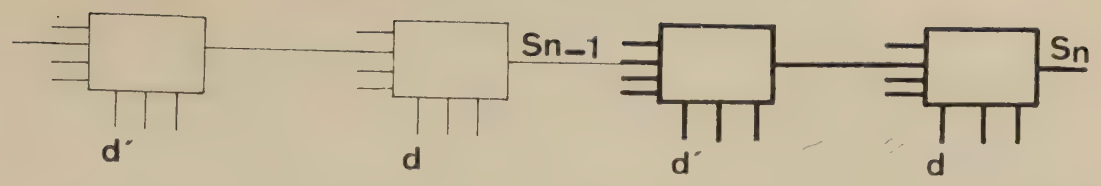
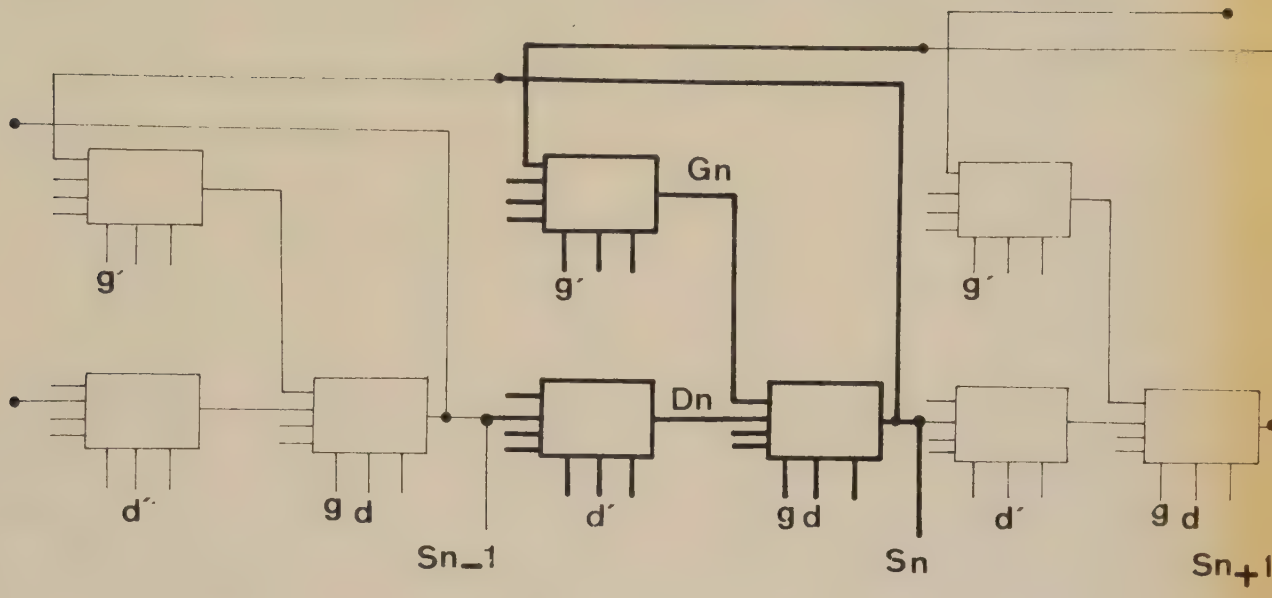
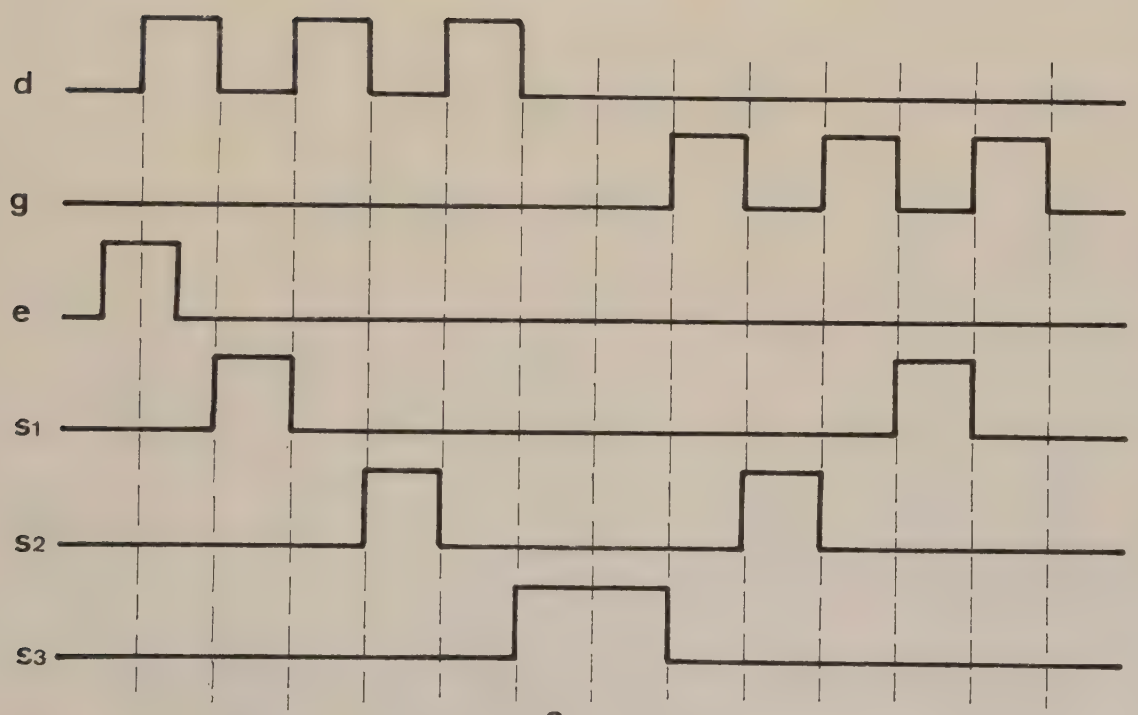


Fig 6. 3. registre à décalage à droite



.1.



.2.

Fig 6.4. registre à décalage dans les deux sens

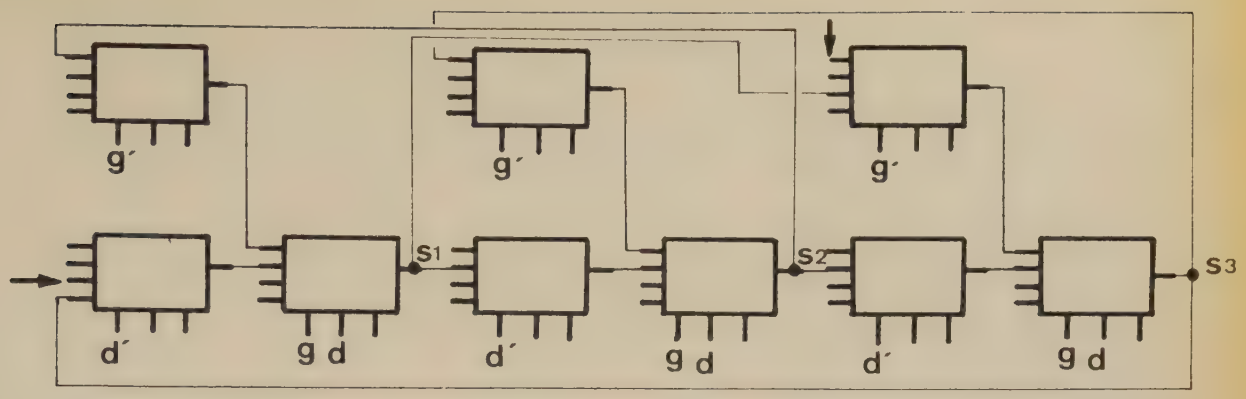


Fig 6.5.

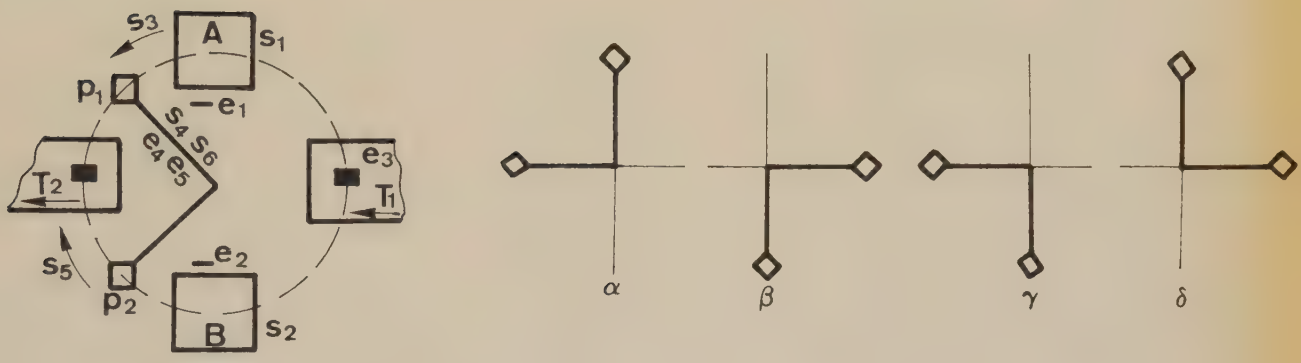


Fig 6.6.

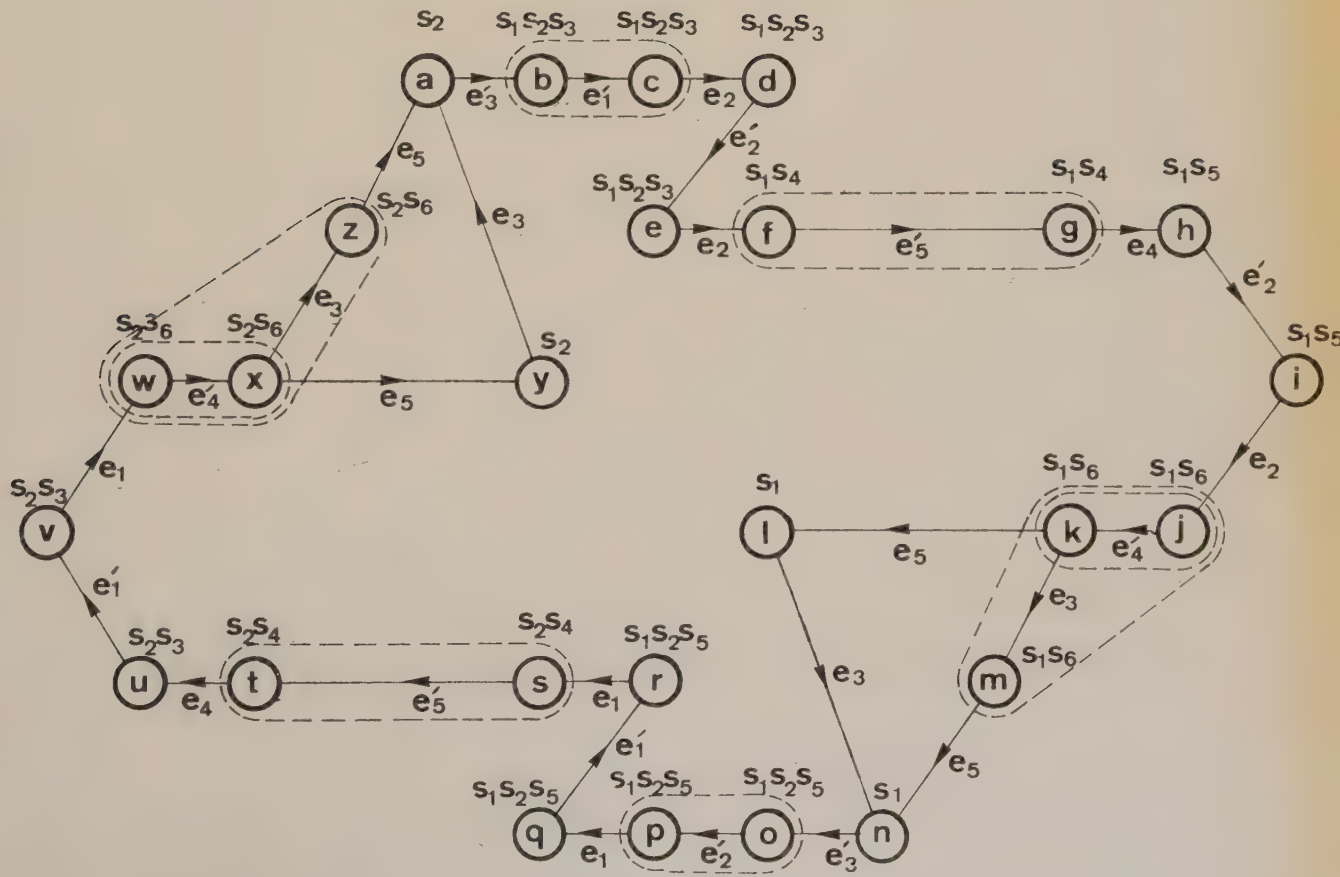


Fig 6.7. graphe des transitions

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
a			e_3		e_5
bc	–	e'_2	e'_3		
d		e_2			
e		e'_2			
fg		e_2		e'_4	–
h		e_2		e_4	
i		e'_2			
jkm		e_2	–	–	e'_5
l			e'_3		e_5
n			e_3		e_5
op	e'_1	–	e'_3		
q	e_1				
r	e'_1				
st	e_1			e'_4	–
u	e_1			e_4	
v	e'_1				
wxz	e_1		–	–	e'_5
y			e'_3		e_5

.1.

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
a	e_1	e'_2	e_3	e'_4	e_5
bc	–	e'_2	e'_3	e'_4	e_5
d	e'_1	e_2	e'_3	e'_4	e_5
e	e'_1	e'_2	e'_3	e'_4	e_5
fg	e'_1	e_2	e'_3	e'_4	–
h	e'_1	e_2	e'_3	e_4	e'_5
i	e'_1	e'_2	e'_3	e_4	e'_5
jkm	e'_1	e_2	–	–	e'_5
l	e'_1	e_2	e'_3	e'_4	e_5
n	e'_1	e_2	e_3	e'_4	e_5
op	e'_1	–	e'_3	e'_4	e_5
q	e_1	e'_2	e'_3	e'_4	e_5
r	e'_1	e'_2	e'_3	e'_4	e_5
st	e_1	e'_2	e'_3	e'_4	–
u	e_1	e'_2	e'_3	e_4	e'_5
v	e'_1	e'_2	e'_3	e_4	e'_5
wxz	e_1	e'_2	–	–	e'_5
y	e_1	e'_2	e'_3	e'_4	e_5

.2.

Fig 6.8. recherche des états sources

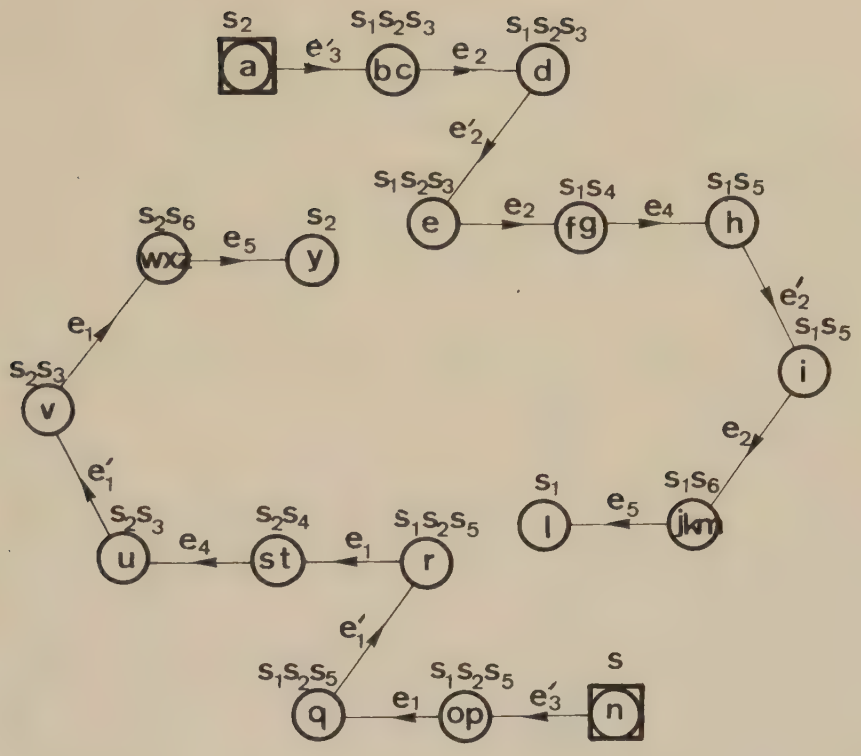


Fig 6.9. graphe fonctionnel simplifié

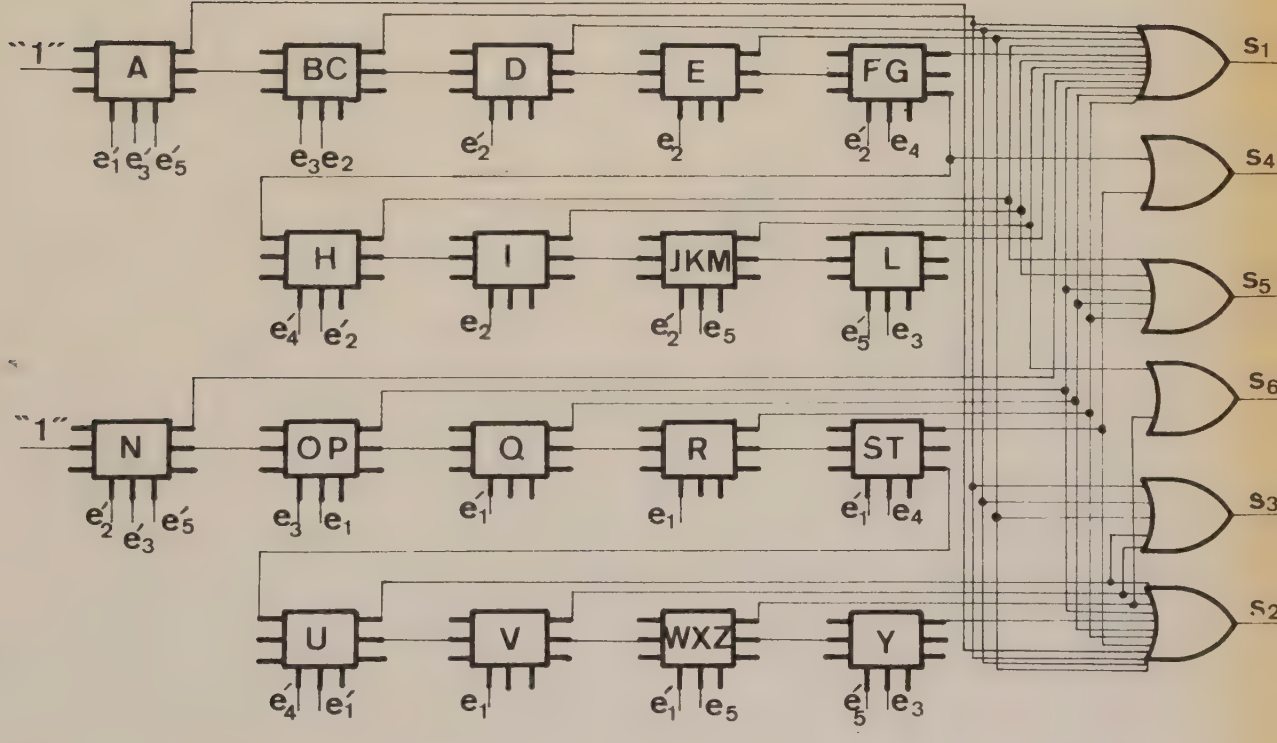


Fig 6.10. réseau cablé

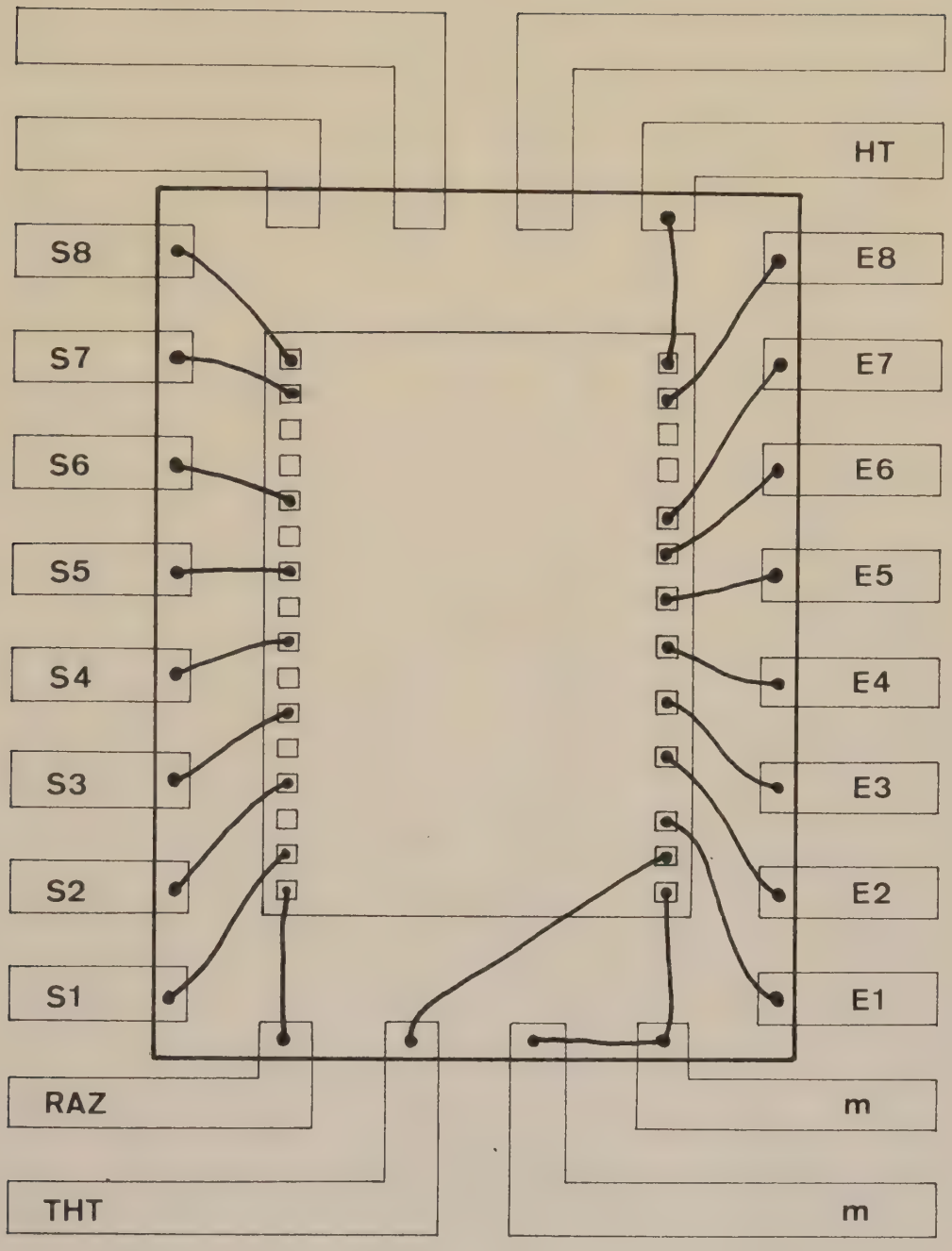


Fig 6.11. montage

	RAZ	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
1	1																
2						1			1								
3				1		1		1	1								1
4		1		1		1			1				1				1
5				1		1										1	1
6						1			1								1
7															1		1
8									1								1
9														1			1
10								1									
11															1		
12								1									
13																1	
14	1																
15		1		1		1	1						1			1	
16		1				1						1	1		1		
17		1	1			1						1	1		1		
18						1						1	1		1		
19			1			1						1		1			
20			1		1						1	1					
21					1						1	1					
22			1		1					1		1					
23			1			1						1					
24			1	1		1	1					1				1	
25			1			1					1	1	1				
26		1				1					1	1	1				
27						1					1	1	1				
28		1				1							1	1			
29		1			1								1		1		
30					1								1		1		
31		1			1					1			1				
32		1				1							1				

Fig 6.12 séquence de test

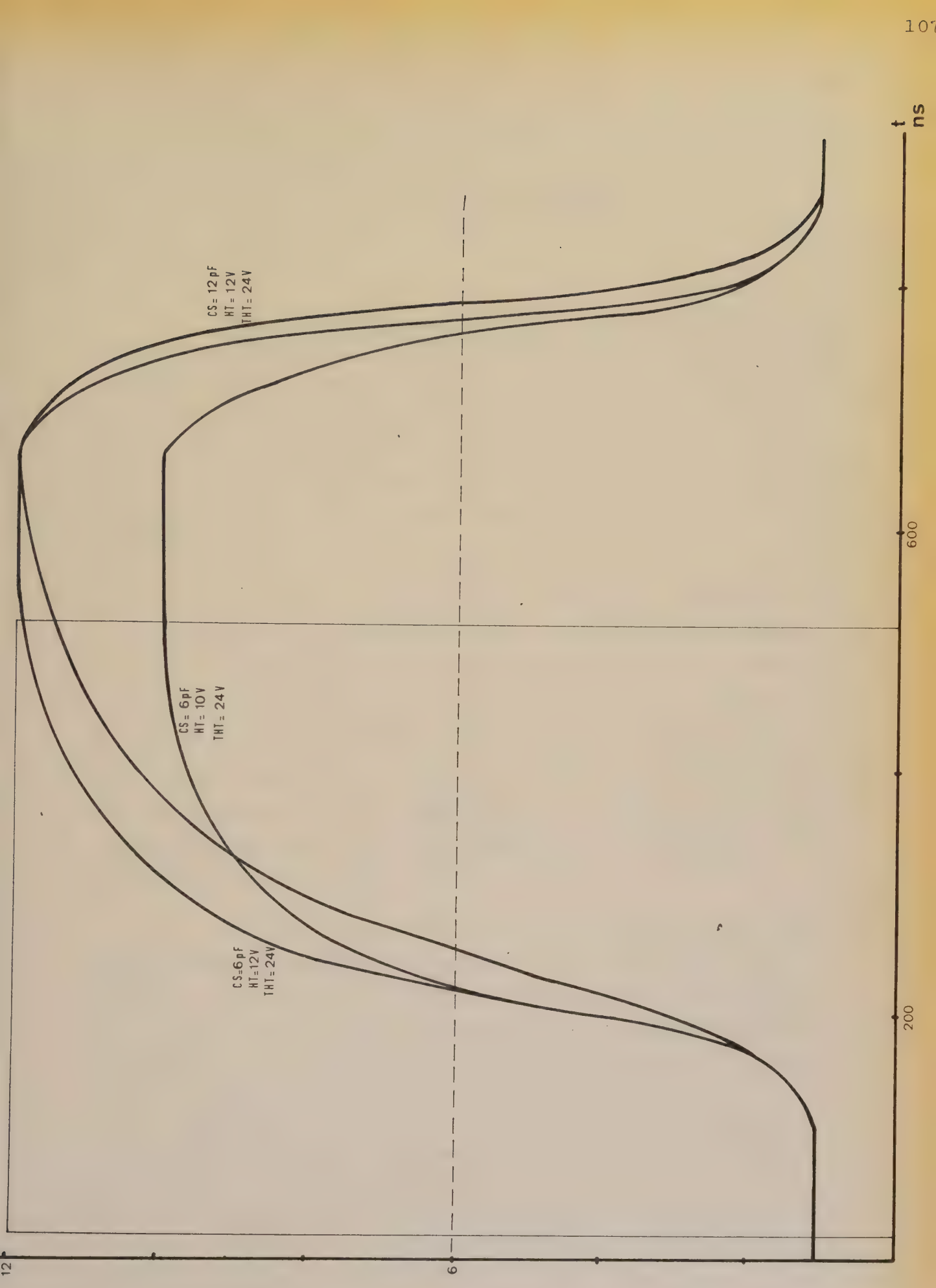

CS= 12 pF
HT= 12V
THT= 24V
CS= 6pF
HT= 10V
THT= 24V
CS=6pF
HT=12V
THT=24V
t
ns
600
200
12
6

Fig 6.13.

C O N C L U S I O N

Dix huit exemplaires d'automates intégrés à grande échelle et fonctionnant correctement (tests logiques et dynamiques satisfaisants) montrent que l'objectif premier de la présente étude a été atteint. Ces circuits prouvent en outre tout l'intérêt de l'utilisation de cellules identiques dans le cadre d'une méthode de synthèse systématique permettant de réaliser des systèmes séquentiels asynchrones complexes.

Le réseau de cellules tel qu'il est établi actuellement "limite" l'intégration à des systèmes présentant en moyenne cinquante états stables dans leur tableau d'états primitif avec quinze entrées et dix sorties. Mais grâce à l'évolution rapide des techniques d'intégration à grande échelle, nous pouvons envisager rapidement la réalisation d'automates beaucoup plus importants et présentant des performances dynamiques meilleures par l'utilisation des connexions multicouches et de l'interconnexion de plusieurs réseaux de cellules entre eux.

Parallèlement à la réalisation pratique, une méthode simple et rapide de traitement des problèmes a été étudiée. Semblable à la synthèse des systèmes séquentiels définis par leur tableau d'états primitif, celle utilisant les graphes permet de visualiser beaucoup mieux et en même temps le fonctionnement de l'automate à réaliser et le réseau cablé qui en résultera, point fondamental pour sa mise au point et sa maintenance. Le graphe devient alors un intermédiaire entre le cahier des charges initial et le cablage final, facile à rendre fonctionnel par application de règles simples et il est particulièrement intéressant pour

les automates industriels de grandes dimensions, susceptibles de modifications petites ou importantes, mais nombreuses, dans le temps.

En outre, cette méthode peut donner lieu à plusieurs prolongements et tout particulièrement à un traitement automatique du graphe. Le calculateur vérifie sa forme fonctionnelle, effectue toutes les simplifications utiles avant de donner le schéma de cablage correspondant et peut apporter une aide non seulement à la synthèse de l'automate, mais aussi à son élaboration. Ainsi, tous ces facteurs peuvent espérer faire déplacer la limite entre les systèmes cablés et les systèmes programmés vers une complexité plus grande pour les premiers.

A N N E X E 1

PROGRAMME DE SIMULATION

DES CIRCUITS LOGIQUES

Le programme présentement décrit permet une simulation analogique statique et dynamique de circuits logiques formés de portes NI, disposées en chaines ou bouclées, par la résolution à chaque pas de calcul d'une suite d'équations aux dérivées partielles (autant d'équations que de portes).

Les objectifs principaux de ce programme sont, outre des résultats précis et une facilité d'emploi, une grande rapidité de calcul permettant un nombre important de passages pour des valeurs différentes des divers paramètres.

Ce programme est écrit en fortran IV pour IBM 360. Le modèle de transistor MOS utilisé est voisin de celui utilisé dans le programme IMAG 2 [17-18] .

Les données à rentrer dans le programme sont :

. Les constantes technologiques : type de substrat, épaisseur d'oxyde fin, profondeur de diffusion .....
. Les sources d'alimentation en tension : HT et THT
. Les valeurs des tensions d'entrée pour le régime continu initial
. A chaque changement de pente dans le temps, les valeurs correspondantes de ces mêmes tensions d'entrée.

Les tensions de sortie nécessaires au dépouillement des résultats sont données sous deux formes :

. tableau de valeurs
. courbes : la subroutine ECOURB permet de tracer une à trois courbes simultanément, l'échelle des tensions en ordonnées s'accordant à la valeur la plus élevée de l'une ou l'autre des courbes.

Le fonctionnement est donné par l'organigramme de la figure 4.6 ; il se décompose en deux parties principales :

1. Régime continu

A partir des constantes technologiques, la subroutine TECHNO calcule toutes les grandeurs technologiques nécessaires pour la suite.

Avec les subroutines CONOR et MOS on effectue alors le calcul du régime continu par itérations successives dans le cas où le circuit logique présente une ou plusieurs boucles, la précision du calcul étant obtenue par un paramètre réglable dans la subroutine TEST.

CONOR est suivi du chiffre 1, 2 ou 4 qui indique le nombre d'entrées de la porte considérée.

2. Régime dynamique

A partir des résultats donnés par le régime continu, le calcul du régime transitoire s'effectue pas à pas, celui-ci étant déterminé par l'incrément de temps DT, incrément pouvant évoluer au cours du calcul en fonction de certains critères : valant 1 ns à l'origine, il est divisé par deux si l'incrément de l'une des tensions d'entrée est supérieur à 100 mV ou si l'incrément de l'une des tensions de sortie est supérieur à 400 mV ; d'un autre côté, il est multiplié par trois si la variation de chaque tension de sortie est inférieure à 15 mV/ns entre deux pas de calcul consécutifs. Tous ces chiffres ont été établis au cours des différents passages pour obtenir le maximum de rapidité sans néanmoins nuire à la précision des résultats.

Après avoir fixé cet incrément de temps DT, nous faisons appel à la subroutine SIGNO qui calcule l'incrément de tension DV4 apparaissant à la sortie d'une porte entre les instants T et T+DT, connaissant toutes les tensions présentes au temps T et les incréments des tensions d'entrée (voir figure 4.7 pour le cas d'une porte NI à deux entrées).

En appliquant la loi des noeuds à la sortie de la porte, on obtient l'équation aux dérivées partielles qui suit :

$$IT1 + \frac{\partial IT1}{\partial V4}.DV4 = IT2 + \frac{\partial IT2}{\partial V4}.DV4 + \frac{\partial IT2}{\partial V5}.DV5 + IT3 + \frac{\partial IT3}{\partial V4}.DV4 + \frac{\partial IT3}{\partial V6}.DV6$$

$$+ CS.\frac{DV4}{DT} + CG1\ \frac{DV4}{DT} + CG2.\frac{DV4-DV5}{DT} + CG3.\frac{DV4-DV6}{DT}$$

soit :

$$DV4 = \frac{IT1-IT2-IT3-\frac{\partial IT2}{\partial V5}.DV5-\frac{\partial IT3}{\partial V6}.DV6 + CG2.\frac{DV5}{DT} + CG3.\frac{DV6}{DT}}{\frac{\partial IT2}{\partial V4} + \frac{\partial IT3}{\partial V4} - \frac{\partial IT1}{\partial V4} + \frac{CS + CG1 + CG2 + CG3}{DT}}$$

Ce calcul est effectué pour chaque porte si bien qu'à la fin d'un pas, nous connaissons toutes les nouvelles valeurs des tensions de sortie pour pouvoir continuer.

Nous donnons maintenant l'ensemble du programme pour la simulation de deux CUSA (cellule universelle pour séquence asynchrone) disposées en série.

M A I N

PROGRAMME DE SIMULATION D'UNE CUSA

```
      COMMON VO, VSS, VMS, K, VTO, ALPHAI, BETA, MUCO, SG,
     XJ, CO, CDO, V1, V2, V3
      DIMENSION U1(91), U2(91), U3(91), U4(91), U5(91)
      REAL K, MUCO, N, NSS, LD1, LG1, LD4, LG4
      WRITE (6,1991)
1991  FORMAT (1H1, 10X, 20 H SIMULATION SICUSAFMN)
      WRITE (6,2300)
2300  FORMAT (1H1, 10X, 20 H LARGEUR DIFFUSION 7)
      READ (5,500) N, NSS, XO
500   FORMAT (2(F3.1, 2X), F6.1)
      CALL TECHNO (N, NSS, XO)
      WRITE (6,1992)
1992  FORMAT (1HO, 10X, 22H DONNEES TECHNOLOGIQUES)
      WRITE (6,1993)
1993  FORMAT (1HO, 7X, 1HN, 7X, 3HNSS, 8X, 2 HVO, 7X, 3HVMS,
     7X, 3HVSS, 9X, 1HK, 4X, 6HA
     x LPHAI, 6X, 4HBETA, 7X, 3HVTO)
      WRITE (6, 400) N, NSS, VO, VMS, VSS, K, ALPHAI, BETA,VTO
400   FORMAT (9 F 10.2)
      READ (5,501) HT, THT
501   FORMAT (F4.1, 1X, F4.1)
      WRITE (6,1994)
1994  FORMAT (1HO, 10X, 22 H SOURCES D'ALIMENTATION)
      WRITE (6,1995)
1995  FORMAT (1HO, 7X, 2HHT, 8X, 3HTHT)
      WRITE (6,401) HT, THT
401   FORMAT (2 F 10.1)
      READ (5, 502) LD1, LG1, ZG2, ZG3, LD4, LG4, ZG5, ZG6
502   FORMAT (8 (F4.1, 1X))
```

ETUDE DU REGIME CONTINU

```
      READ (5, 503) T1, EEP1, EP1
503   FORMAT (F5.1,5X, 2 (F4.1, 1X))
      EEP = EEP1
      EP  = EP1
      V1  = 0.0
      V2  = HT
      V3  = THT
      V5  = EEP
      V8  = EP
      V14 = 0.0
      V16 = 0.0
      V17 = 0.0
      CALL CONOR 2 (V4, V5, 0.0, LD4, LG4, 5.0, 17.0, 11.0,
      ZG5, 17.0, 11.0, ZG6)
3     CALL CONOR 2 (V6, V14, V17, LD1, LG1, 5.0, 17.0, 11.0,
      ZG2, 17.0, 11.0, ZG3)
      CALL CONOR 2 (V7, V16, V8, LD4, LG4, 5.0, 17.0, 11.0,
      ZG5, 17.0, 11.0, ZG6)
      CALL TEST (V4, V14,  1)
      CALL TEST (V6, V16,  1)
      CALL TEST (V7, V17,  1)
      GO TO 2
1     V14 = V4
      V16 = V6
      V17 = V7
      GO TO 3
2     WRITTE (6, 1996)
1996  FORMAT (1HO, 10X, 14H REGIME CONTINU)
      WRITE (6, 1997)
1997  FORMAT (1HO, 5X, 3 HEEP, 8X, 2 HEP, 7X, 3HVS1, 8X,
      2HVI, 8X, 2HVS)
```

```
      WRITE (6, 402) EEP, EP, V4, V6, V7
402   FORMAT (5 F 10.2)
      U1(1) = EEP
      U2(1) = EP
      U3(1) = V4
      U4(1) = V6
      U5(1) = V7
      WRITE (6, 1998)
1998  FORMAT (1HO, 10X, 20 H DONNEES GEOMETRIQUES)
      WRITE (6, 1999)
1999  FORMAT (1 HO, 6X, 3 HLD1, 7X, 3 HLG1, 7X, 3 HZG2, 7X,
     3 HZG3, 7X, 3 HLD4, 7 X, 3 HLG4,
     * 7X, 3 HZG5, 7X, 3 HZG6)
      WRITE (6,403) LD1, LG1, ZG2, ZG3, LD4, LG4, ZG5, ZG6
403   FORMAT (8 F 10.1)
```

ETUDE DU REGIME TRANSITOIRE

```
      WRITE (6, 2000)
2000  FORMAT (1 H1, 10X, 18 H REGIME TRANSITOIRE)
      WRITE (6, 2001)
2001  FORMAT (1 HO, 6X, 1 HT, 7X, 3 HEEP, 8X, 2 HEP, 7X,
     3 HVS1, 8X, 2HV1, 8X, 2 HVS,
     * 8X, 2HC1, 8X, 2 HC2, 8X, 2 HC3, 8X, 2HP1, 8X, 2HP2,
     8X, 2HP3)
```

INITIALISATION DU REGIME TRANSITOIRE

```
      DTA = 1.0
      KI  = 2
      LI  = 3
      U14 = 0.0
      U24 = 0.0
      U34 = 0.0
      U17 = 0.0
```

```
      U27 = 0.0
      U37 = 0.0
      DV14 = 0.0
      DV16 = 0.0
      DV17 = 0.0
      C 14 = 0.0
      C 16 = 0.0
      C 17 = 0.0
      P 1 = 0.0
      P 2 = 0.0
      P 3 = 0.0
```

DEUXIEME CARTE DE DONNEES

```
      READ (5, 503) T2, EEP 2, EP 2
```

NOMBRE D'INCREMENTS

```
8     NC = T2 - T1
```

INCREMENT DE TENSION

```
      DEEPD = (EEP2 - EEP1)/NC
      DEPD  = (EP2 - EP1)/NC
```

INITIALISATION DU CALCUL

```
      DT = 1.0
      T  = T1
      EEPD = EEP1
      EPD  = EP1
```

```
      DEBUT DE CALCUL

      DEP = DEPD
      DEEP = DEEPD
12      IF (ABS (DEP)  - 0.1) 24, 24, 10
24      IF (ABS (DEEP) - 0,1) 11, 11, 10
10    DEP = DEP/2.0
      DEEP = DEEP/2.0
      DT  =DT/2.0
        GO TO 12

      CALCUL DES INCREMENTS DE TENSION

11    CALL SIGNO2 (0.0, V5, V4, DV4, LD4, LG4, 5.0, 17.0,
      11.0, ZG5,
     x 17.0, 11.0, ZG6, 0.0, 13.0, 950.0,0. 0, DEEP, C14,
      C 5, C9, DT, C1)
      CALL SIGNO2 (V4, V7, V6, DV6, LD1, LG1, 5.0, 17.0,
      11.0, ZG2,
     x 17.0, 11.0, ZG3, 0.0, 13.0, 370.0, DV 14, DV 17, C 16,
      C4, C7, DT, C2)
      CALL SIGNO2 (V6, V8, V7, DV7, LD4, LG4, 5.0, 17.0,
      11.0, ZG5,
     x 17.0, 11.0, ZG6, 0.0, 13.0, 950.0, DV 16, DEP, C17,
      C6, C8, DT, C3)
        IF (ABS (DV4) - 0.40) 13, 13, 14
13      IF (ABS (DV6) - 0.40) 15, 15, 14
15      IF (ABS (DV7) - 0.40) 16, 16, 14
14    DEP = DEP/2.0
      DEEP = DEEP/2.0
      DT  = DT/2.0
      GO TO 11
```

NOUVELLES VALEURS DES TENSIONS

```
16    V4 = V4 + DV4
      V6 = V6 + DV6
      V7 = V7 + DV7
      EP = EDP + DEP
      EEP = EEPD + DEEP
      V5 = EEP
      V8 = EP
      P1 = ((C1*DT + (P1*T)/V2)/(T+DT))*V2
      P2 = ((C2*DT + (P2*T)/V2)/T + DT))*V2
      P3 = ((C3*DT + (P3*T)/V2)/T + DT))*V2
      DV 14 = DV4
      DV 16 = DV6
      DV 17 = DV7
      C 14 = C4
      C 16 = C6
      C 17 = C7
```

INCREMENTATION DU TEMPS

```
      T = T + DT
      IT = T
```

POURSUITE DU CALCUL

```
      EEPD = EEP
      EDP  = EP
```

COMPARAISON DE T A T2 ET ECRITURE

```
        IF (T-T2) 4, 5, 5
4       IF (LI-64) 20, 19, 19
19    WRITE ( 6, 2002)
2002  FORMAT (1H 1, 6X, 1 HT, 7X, 3 HEEP, 8X, 2 HEP, 7X, 3 HVS1,
      8X, 2 HVI, 8X, 2 HVS,
     * 8X, 2 HC1, 8X, 2 HC2, 8X, 2 HC3, 8X, 2 HP1, 8X, 2 HP2,
      8X, 2 HP3)
```

```
      LI = 1
20    WRITE (6, 404) T, V5, V8, V4, V6, V7, C1, C2, C3,
      P1, P2, P3
404   FORMAT (6 F 10.2, 6 E 10.2)
      LI = LI + 1
21    J = 5*KI-5
        IF (IT-J) 22, 23, 23
23    U1 (KI) = V5
      U2 (KI) = V8
      U3 (KI) = V4
      U4 (KI) = V6
      U5 (KI) = V7
      KI = KI + 1
      GO TO 21

      TEST POUR AUGMENTATION DU PAS

22    U 14 = U 24
      U 24 = U 34
      U 34 = V 4
      U 17 = U 27
      U 27 = U 37
      U 37 = V 7
      U 124 = (U24 - U14)/DTA
      U 234 = (U34 - U24)/DT
      U 127 = (U27 - U17)/DTA
      U 237 = (U37 - U27)/DT
      DTA = DT
        IF (ABS (U 234 - U 124) - 0.020) 17, 17, 11
17      IF (ABS (U 237 - U 127) - 0.020) 18, 18, 11
18    DEP = 3.0*DEP
      DEEP = 3.0*DEEP
      DT  = 3.0*DT
      GO TO 11
```

```
      TRANSLATION DES ANCIENNES VALEURS

>     EEP 1 = EEP 2
      EP 1  = EP 2
      T1 = T2

      LECTURE D'UNE NOUVELLE CARTE DE DONNEES

      READ (5, 503) T2, EEP 2, EP 2

      TEST DE LA FIN DU CALCUL

        IF (T2) 7, 7, 8
7     WRITE (6,404)T, V5, V8, V4, V6, V7, C1, C2, C3, P1,
      P2, P3
      U1 (KI) = V5
      U2 (KI) = V8
      U3 (KI) = V4
      U4 (KI) = V6
      U5 (KI) = V7

      SORTIE DES COURBES

      WRITE (6, 1991)
      WRITE (6, 2003)
2003  FORMAT (1 HO, 20X, 7 HEEP = *, 5X, 6HEP =.,5X, 6HVS= + )
      CALL ECOURB (450, U1, U2, U5)
      WRITE (6, 1991)
      WRITE (6, 2004)
2004  FORMAT (1 HO, 20X, 7HEEP = *, 5X, 7HVSI=.,5X, 6HVI= +)
      CALL ECOURB (450, U1, U3, U4)
      STOP
      END
```

TECHNO

```
      SUBROUTINE TECHNO (N, NSS, XO)
      COMMON VC, VSS, VMS, K, VTO, ALPHAI, BETA, MUCO, SG,
      XJ, CO, CDO, V1, V2, V3
      REAL K1, MU, K, MUOO, N, NSS
        IF (N-2) 1, 2, 3
            N = 5
3     K1 = 0,95
      ALPHA = 3.0
      MU = 3.0E-2
      CDO = 1.0E-16
      GO TO 4
            N = 2
2     K1 = 2.8
      ALPHA = 3.0
      MU = 2.1E-2
      CDO = 1.6 E-16
      GO TO 4
            N = 0.5
1     K1 = 2.0
      ALPHA = 2.0
      MU = 1.9 E-2
      CDO = 3.8 E-16

4     K = K1*XO/1500
      ALPHAI = 1/ALPHA
      OO=1/(9.0*3.14E - 1*XO)
      MUCO = MU* CO
      VO = 0.7
      VMS = 0.3
      QSS = 1.6 E-4*NSS
      VSS = QSS/CO
      BETA = 0.25
      SG = 1.2
      XJ = 4.2
      VTO=VO + VMS+ VSS+ K*(VO)**ALPHAI
      RETURN
      END
```

MOS

```
      SUBROUTINE MOS (LD, LG, ZG, VS1, VD1, VG, IT, CG)
      COMMON VO, VSS, VMS, K, VTO, ALPHAI, BETA, MUCO, SG,
     XJ, CO, CDO, V1, V2, V3
      REAL IT, K, MUCO, LD, LG, L
      V7 = VSI
      V8 = VDI
      V9 = VG - VSI
      V4 = VG - VDI
      V5 = VDI - VSI
      L = LD-2*(SG+ 0.8*XJ)
      Z = ZG+ 2*SG
      G = Z/L
      GG = MUCO*G/2.0
        IF (V8-V7)2, 2, 1
2     VS = V8
      GO TO 3
1     VS = V7
3     VT = VO+ VSS+ VMS+ K*(VS+ VO)**ALPHAI
        IF (V7-V8) 5, 5, 4
5     PHI1 = BETA*V5
      GO TO 6
4     PHI1 = 0.0
6       IF (V7-V8) 8, 8, 7
8     PHI2 = 0.0
      GO TO 9
7     PHI2 = BETA*V5
9       IF (V9-VT) 10, 10, 11
10    F1 = 0.0
      GO TO 12
11    F1 = (V9-VT)*(V9-VT)+ PHI1
12      IF (V4-VT) 13, 13, 14
13    F2 = 0.0
```

```
      GO TO 15
14    F2 = V4-VT) * (V4 - VT) - PHI2

      EXPRESSION DU COURANT

15    IT = GG * (F1 - F2)
      CG = CO * Z * (LG+ 2 *SG) * 1.0E - 12/2
      RETURN
      END
```

CD1

```
SUBROUTINE CDI (LA, LO, CD, V)
COMMON VO, VSS, VMS, K, VTO, ALPHAI, BETA, MUCO, SG,
XJ, CO, CDO, V1, V2, V3
REAL LA, LO
S = (LA + 2*SG + 2*0.8*XJ) * (LO + 2*SG + 2*0.8*XJ)
CD = CDO * S/(1 + V/VO) ** ALPHAI
RETURN
END
```

CONOR 2

```
      SUBROUTINE CONOR 2 (V4, V5, V6, LD1, LG1, ZG1, LD2,
      LG2, ZG2, LD3 , LG3 , ZG3 )
      COMMON VO, VSS, VMS, K, VTO, ALPHAI, BETA, MUCO, SG,
      XJ, CO, CDO, V1, V2, V3
      REAL IT1, IT2, IT3, ITT1, K, MUCO, LD1, LD2, LD3,
      LG1, LG2, LG3
      V = 0.0
      VV = V2
6     V4 = (V+ VV)/2.0
      CALL MOS (LD1,LG1, ZG1, V4, V2, V3 , IT1, CG1)
      CALL MOS (LD2, LG2, ZG2, V1, V4, V5, IT2, CG2)
      CALL MOS (LD3 , LG3 , ZG3 , V1, V4, V6, IT3 , CG3)
      ITT1 = IT2+ IT3
        IF (ITT1 - IT1) 2, 2, 1
1     VV = V4
      GO TO 3
2     V = V4
3       IF (VV - V - 0.01) 5, 5, 4
4     GO TO 6
5     V4 = (V+ VV)/2.0
      RETURN
      END
```

TEST

```
      SUBROUTINE TEST (V, VI, *)

        IF (V - VI) 1, 2, 3
1     AV = VI - V
        GO TO 4
3     AV = V - VI
4       IF (AV - 0.01) 2, 2, 5
5     RETURN1
2     V = (V+ VI)/2.0
      RETURN
      END
```

SIGNO 2

```
      SUBROUTINE SIGNO2 (V5, V6, V4, DV4, LD1, LG1, ZG1, LD2,
      LG2, ZG2,
     * LD3, LG3, ZG3, CE, LA, LO, DVI5, DVI6, CI4, C5, C6,
      DT, CTI1)
      COMMON VO, VSS, VMS, K, VTO, ALPHAI, BETA, MUCO, SG,
      XJ, CO, CDO, V1, V2, V3
      REAL LD1, LG1, LD2, LG2, LD3, LG3, LA, LO, NUME

            CALCUL DES DERIVEES PARTIELLES
            MOS DE CHARGE
      CALL MOS (LD1, LG1, ZG1, V4, V2, V3, CTI1, CG1)
      VV4 = V4+ 0.1
      CALL MOS (LD1, LG1, ZG1, VV4, V2, V3, CT1, CG1)
      TS1 = (CT1 - CTI1)/0.1

            MOS DE COMMANDE 2

      CALL MOS (LD2, LG2, ZG2, V1, V4, V5, CTI2, CG2)
      VV5 = V5 + 0.1
      CALL MOS (LD2, LG2, ZG2, V1, V4, VV5, CTE 2, CG2)
      TE2 = (CTE 2 - CTI2)/0.1
      CALL MOS (LD2, LG2, ZG2, V1, V4, VV5, CTE 2, CG2)
      TS2 = (CTS 2 - CTI2)/0.1

            MOS DE COMMANDE 3

      CALL MOS (LD3, LG3, ZG3, V1, V4, V6, CTI3, CG3)
      VV6 = V6+ 0.1
      CALL MOS (LD3, LG3, ZG3, V1, V4, VV6, CTE3, CG3)
      TE3 = (CTE3 - CTI3)/0.1
      CALL MOS (LD3, LG3, ZG3, V1, VV4, V6, CTS3, CG3)
      TS3 = (CTS3 - CTI3)/0.1
```

```
      CAPA DE CHARGE

      CALL CDI (LA, LO, CD, V4)
      CS = CD+ CE + CG1+ CG2 + CG3

      DIVISEUR

      DIVI = TS1 - TS2 - TS3 - C8/(DT * 1.0E-9)

      NUMERATEUR

      NUME = TE2 * DVI5 + TE3 * DVI6-CG2*DVI5(DT*1.0E-9)
            -CG3*DVI6/(DT * 1.0E-9)
     * - CI4 - CTI1+ CTI2 + CTI3

      VALEUR DE L'INCREMENT DE TENSION

      DV4 = NUME/DIVI
      C5 = CG2 * DV4/(DT*1.0E-9)-2*CG2*DVI5/(DT*1.0E-9)
      C6 = CG3 * DV4/(DT*1.0E-9)-2*CG3*DVI6/(DT*1.0E-9)
      RETURN
      END
```

ECOURB

```
      SUBROUTINE ECOURB (ITMAX, V1, V2, V3)
      DIMENSION V1(91), V2(91), V3(91), IVREP(10), KTAB(101)
      DATA KBLAN/1H /
      DATA KETOI/1H*/
      DATA KPLUS/1H+ /
      DATA KPOIN/1H ./
C     ETOI=V1       POIN=V2    PLUS=V3
      KMAX=ITMAX/5 + 1
            DO 1 K=1,KMAX
           IF(V1(K)-V2(K))2,2,3
2     VMAX=V2(K)
            GO TO 4
3     VMAX=V1(K)
4          IF(VMAX-V3(K))5,5,1
5     VMAX=V3(K)
1     CONTINUE
           IF(VMAX-10.0)6,6,7
6     VMAX=10
            GO TO 8
7     VMAX=20
8           DO 9 J=1,10
9     IVREP(J)=J*VMAX/10
      WRITE(6,200)(IVREP(J),J=1,10)
200   FORMAT(9X, 1H0, 10(8X,I2))
            DO 13 I=1,101
13    KTAB(I)=KBLAN
            DO 10 I=1,101,10
10    KTAB(I)=KPOIN
      IT=0
      WRITE(6,300)IT,(KTAB(I),I=1,101)
300   FORMAT(5X,I3,1X,101A1)
            DO 12 K=1,KMAX
      IV1=(V1(K)/VMAX)*100 + 1
      IV2=(V2(K)/VMAX)*100 + 1
      IV3=(V3(K)/VMAX)*100+ 1
```

```
      DO 11 I=1,101
11    KTAB(I)=KBLAN
      KTAB(IV1)=KETOI
      KTAB(IV2)=KPOIN
      KTAB(IV3)=KPLUS
      KTAB(1)  =KPOIN
      KTAB(31)=KPOIN
      IT=5*K-5
12    WRITE(6,300)IT,(KTAB(I),I=1,101)
      RETURN
      END
```

A N N E X E 2

PROGRAMME DE DESCRIPTION DES MASQUES

DU RESEAU DE CELLULES

Le programme de description du réseau de CUSA intégré à grande échelle permet de commander, soit un coordinatographe qui trace chacun des quatre niveaux sur une feuille pelliculable à une échelle quelconque (c'est en général l'échelle 200 suivie ensuite de deux réductions photographiques : échelle 50 puis 10), soit une machine à dessiner à l'échelle 10 qui trace chaque niveau plus rapidement que la première par procédé photographique à une échelle ne nécessitant aucune réduction avant la photorépétition.

Chaque masque est constitué par une série de rectangles. En effet, le motif élémentaire est un rectangle déterminé entièrement par les coordonnées X et Y de son sommet inférieur gauche, sa longueur et sa largeur.

L'élaboration du paquet de cartes pour la description de notre circuit s'est effectuée en deux parties principales :

- la première partie comprend la description de tout l'ensemble figé du réseau, y compris les lignes d'alimentation et de masse dont on n'aura plus à s'occuper ultérieurement. Ainsi, chaque cellule élémentaire a été dessinée à grande échelle (1000), puis chaque rectangle entrant dans la composition a été coté individuellement. Une translation multiple conduit ensuite au réseau complet.

- la seconde partie a utilisé largement le programme ESPACE mis en oeuvre au LETI, ce qui a permis, à partir d'un langage simplifié de description de l'automate, d'obtenir l'ensemble des rectangles correspondant à toutes les interconnexions avec les paramètres technologiques que l'on a adoptés. Il ne reste à faire ensuite qu'une translation convenable dans les directions x et y pour placer chacun des trois sous-ensembles (connexions primaires, secondaires et sorties) à l'endroit correspondant dans le réseau de cellules construit dans la première étape.

Chaque niveau est une association plus ou moins grande de ces deux parties. Dans ce qui suit, nous donnons la série des éléments constitutifs de chacun d'eux.

1. MASQUE DE DIFFUSIONS

DEBUT
BUFFER DE SORTIE
PORTE DE SORTIE
CUSA
CIRCUIT D'ENTREE
CIRCUIT DE SECURITE DES ENTREES
TRANSLATIONS MULTIPLES BUFFER DE SORTIE
" " PORTE DE SORTIE
" " CUSA
" " CIRCUIT D'ENTREE
" " CIRCUIT DE SECURITE DES ENTREES
CIRCUIT DE SECURITE RAZ
DIFFUSIONS SUPPLEMENTAIRES
NUMERO DE CIRCUIT
CROIX DE POSITIONNEMENT
ASSEMBLAGE
TRANSLATION
POSITIONNEMENT EXTERIEUR
ASSEMBLAGE FINAL
STOP

2. MASQUE DE RESERVATION DES GRILLES

DEBUT
BUFFER DE SORTIE
PORTE DE SORTIE
CUSA
CIRCUIT D'ENTREE
CIRCUIT DE SECURITE DES ENTREES
TRANSLATIONS MULTIPLES BUFFER DE SORTIE
" " CUSA - PORTE DE SORTIE
" " CIRCUIT D'ENTREE ET DE SECURITE DES ENTREES
CIRCUIT DE SECURITE RAZ
AVANT-TROUS SUPPLEMENTAIRES
MODIFICATIONS DUCIRCUIT D'ENTREE
NUMERO DE CIRCUIT
CROIX DE POSITIONNEMENT
MODIFICATIONS DES PORTES DE SORTIE
ASSEMBLAGE INTERMEDIAIRE
GRILLES ENTREES PRIMAIRES
GRILLES ENTREES SECONDAIRES
GRILLES SORTIES
TRANSLATION GRILLES ENTREES PRIMAIRES
" GRILLES ENTREES SECONDAIRES
" GRILLES SORTIES
ASSEMBLAGE
TRANSLATION
POSITIONNEMENT EXTERIEUR
ASSEMBLAGE FINAL
STOP

3. MASQUE DE RESERVATION DES TROUS

DEBUT
BUFFER DE SORTIE
PORTE DE SORTIE
CUSA
CIRCUIT D'ENTREE
CIRCUIT DE SECURITE D'ENTREE
CIRCUIT DE SECURITE RAZ
TROUS SUPPLEMENTAIRES
TRANSLATIONS MULTIPLES BUFFER DE SORTIE
" " PORTE DE SORTIE - CUSA
" " CIRCUIT D'ENTREE
" " CIRCUIT DE SECURITE D'ENTREE
NUMERO DE CIRCUIT
CROIX DE POSITIONNEMENT
TROUS ENTREES PRIMAIRES
TROUS ENTREES SECONDAIRES
TROUS SORTIES
TRANSLATION TROUS ENTREES PRIMAIRES
" TROUS ENTREES SECONDAIRES
" TROUS SORTIES
ASSEMBLAGE
TRANSLATION
POSITIONNEMENT EXTERIEUR
ASSEMBLAGE FINAL
STOP

4. MASQUE DES METALLISATIONS

DEBUT
BUFFER DE SORTIE
PORTE DE SORTIE
CUSA
CIRCUIT D'ENTREE
CIRCUIT DE SECURITE D'ENTREE
CIRCUIT DE SECURITE RAZ
TRANSLATIONS MULTIPLES BUFFER DE SORTIE
" " PORTE DE SORTIE - CUSA
" " CIRCUIT D'ENTREE
" " CIRCUIT DE SECURITE D'ENTREE
FILS D'ALIMENTATIONS
PLOTS INFERIEURS
NUMERO DE CIRCUIT
CROIX DE POSITIONNEMENT
SIGLE LAG
ASSEMBLAGE INTERMEDIAIRE
CONNEXIONS DES PORTES DE SORTIE
METALLISATIONS ENTREES PRIMAIRES
" ENTREES SECONDAIRES
" SORTIES
TRANSLATION METALLISATIONS ENTREES PRIMAIRES
" " ENTREES SECONDAIRES
" " SORTIES
ASSEMBLAGE
TRANSLATION
POSITIONNEMENT EXTERIEUR
ASSEMBLAGE FINAL
STOP

A N N E X E 3

COMMANDE SEQUENTIELLE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR PILOTE DU LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE

Ce système a pour objectif, la mise en route, la surveillance et l'arrêt automatiques de l'échangeur de chaleur dont la description est donnée par la fig. 9.1. Quand le système est à l'arrêt, les circuits d'eau sont sous pression, c'est-à-dire que les niveaux dans les ballons sont corrects. Par conséquent, mis à part la mise en route et l'arrêt, le travail essentiel de l'automate est un travail de surveillance continue.

Cet automate est conçu essentiellement pour un fonctionnement automatique de l'échangeur : après avoir appuyé le bouton poussoir A, les opérations s'effectuent dans l'ordre prévu avec toute la sécurité requise. En outre, pour des raisons de souplesse (possibilité de modifications des cycles de fonctionnement), il existe un fonctionnement manuel qui peut intervenir à n'importe quel moment. L'automate doit donc être construit pour permettre le passage manuel-automatique ou réciproquement sans difficulté. D'autre part, si le système a un défaut de fonctionnement, même momentané, l'opérateur devra passer en manuel pour corriger ce défaut avant de revenir en fonctionnement automatique.

L'ensemble de l'automate comporte 17 entrées et 22 sorties répertoriées sur la fig. 9.2. De par ses caractéristiques physiques, il se divise très facilement en cinq sous-automates qui sont les suivants :

. SA1 : sous-séquence principale : démarrage et arrêt du processus ;
. SA2 : sécurité du ballon chaud 1
. SA3 : sécurité du ballon chaud 2
. SA4 : sécurité du ballon chaud 3
. SA5 : sécurité du ballon froid

Les entrées actuelles de l'automate, autres que celles venant directement du processus, sont uniquement celles actionnées par les deux boutons-poussoir m et A. Il pourra être possible ultérieurement d'ajouter des entrées extérieures venant par exemple d'un calculateur, ce qui permettra d'évoluer dans plusieurs cycles différents, la description du fonctionnement à l'aide de graphes permettant facilement ces modifications.

SA1. Sous-séquence principale (figures 9.3 et 9.4)

En fonctionnement automatique, les alimentations du processus se mettent séquentiellement dans l'ordre électricité, air puis eau dès que l'on appuie sur le bouton poussoir A. Dès que la pression d'eau est suffisante, le chauffage peut commencer, l'échangeur n'étant pas encore alimenté. Dès que la différence de température existant entre la température affichée et la température effective de l'eau dans les ballons chauds devient inférieure à un certain seuil ε, l'échangeur est alimenté à la fois en eau chaude et froide. Il se trouve alors dans l'état correspondant à un fonctionnement normal pour lequel on peut faire de la régulation par calculateur.

Si ε devient supérieure au seuil, l'échangeur n'est plus alimenté. Il faut attendre que cette valeur diminue pour retrouver à nouveau le fonctionnement normal. Sinon, dès que l'on relâche A, le chauffage des ballons est immédiatement arrêté, mais non l'alimentation de l'échangeur. Cette dernière est arrêtée seulement dès que la température de l'eau dans les ballons est suffisamment baissée.

Après un certain retard, toutes les alimentations sont coupées simultanément et on se retrouve en position de départ.

SA1 comporte 12 états, 10 et 11 correspondant à son fonctionnement manuel. Les états 1, 10 et 11 sont des états sources.

SA2 - SA3 - SA4. Sécurité de chaque ballon chaud (figures 9.5 et 9.6)

Chacun des trois ballons chauds ayant un fonctionnement identique, les séquences qui en assurent la sécurité sont les mêmes.

Le point de fonctionnement normal correspond au noeud 1. De cet état, le niveau d'eau peut monter ou baisser (5 ou 2) pour ensuite retrouver sa valeur normale (6 ou 3). Pour chaque état, l'action nécessaire est effectuée, mais il est nénamoins signalé à l'opérateur qu'il y a eu un défaut de fonctionnement même momentané.

Chaque sous-automate SA2, SA3 ou SA4 comporte sept états, l'état 7 correspondant au fonctionnement manuel. Les états 1 et 7 sont sources.

SA5. Sécurité du ballon froid (figures 9.7 et 9.8)

SA5 est semblable aux trois précédentes, mais néanmoins un peu plus simple. En effet, ce ballon est alimenté en permanence par l'eau arrivant de l'extérieur tandis que les trois autres fonctionnent en circuit fermé.

SA5 ne comporte que cinq états, 5 correspondant au fonctionnement manuel. 1 et 5 sont des états sources.

Sur la fig. 9.9 sont représentées quelques sorties réelles correspondant aux différents actionneurs du processus. Toutes sont des fonctions combinatoires suivies d'un étage amplificateur. Les entrées de l'automate sont celles fournies par le processus sauf DCF qui est DC + DF.

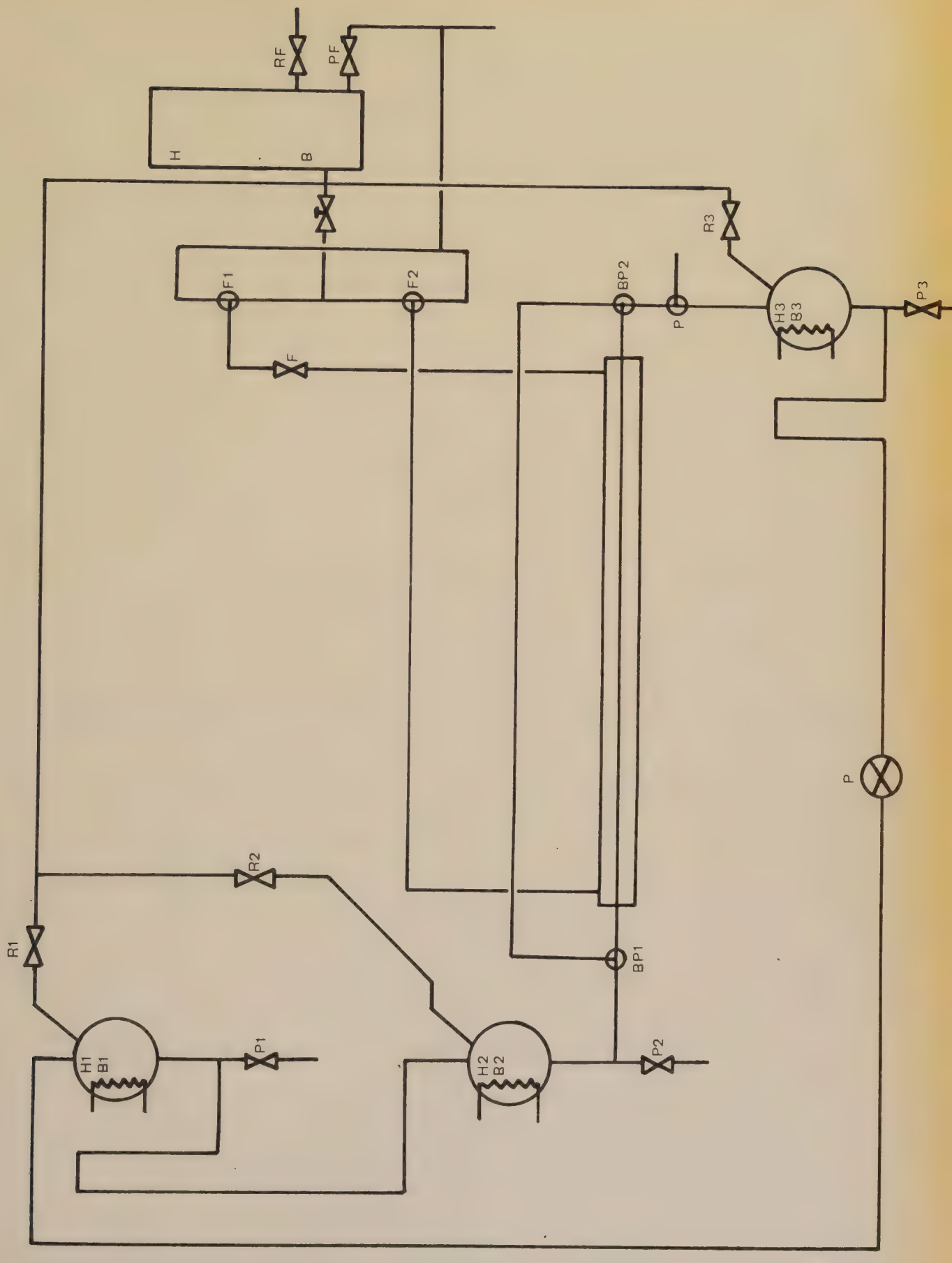


Fig 9.1. échangeur de chaleur

ECHANGEUR

Entrées (17)

m, A	boutons poussoir
H, B	mesures de niveau
H1, B1	
H2, B2	
H3, B3	
PE	mesures de pression
PAI	
PEA	
ε	températures
t	
DC, DF	débits

Sorties de l'automate (22)

E, AI, EA	ouverture circuits d'alimentation
AC	autorisations de chauffage
AC1, AC2, AC3	
BP_f, BP_P	ouverture by-pass
AE	alimentation échangeur
P	alimentation pompe
OF	ouverture circuit froid
RF	remplissage ballons
R1, R2, R3	
P, PF	purge ballons
P1, P2, P3	
M	passage en manuel

Figure 9.2

SA.1. SOUS-SEQUENCE PRINCIPALE

Entrées

A	bouton poussoir mise en marche
m	passage en fonctionnement manuel
PE	présence électricité
PAI	présence air
PEA	présence eau
E	seuil sur signal d'erreur (différence de températures)
t	seuil bas prise de température
t_τ	" " " " temporisée
DCF	débit circuit chaud ou froid DC + DF

Sorties

E	ouverture circuit électricité
AI	ouverture circuit air
EA	ouverture circuit eau
AC	autorisation chauffage
BP_P	ouverture by-pass (BP1 et BP2) et fonctionnement normal de l'échangeur
P	fonctionnement pompe
AE	alimentation échangeur
M	demande de passage en manuel

Figure 9.3

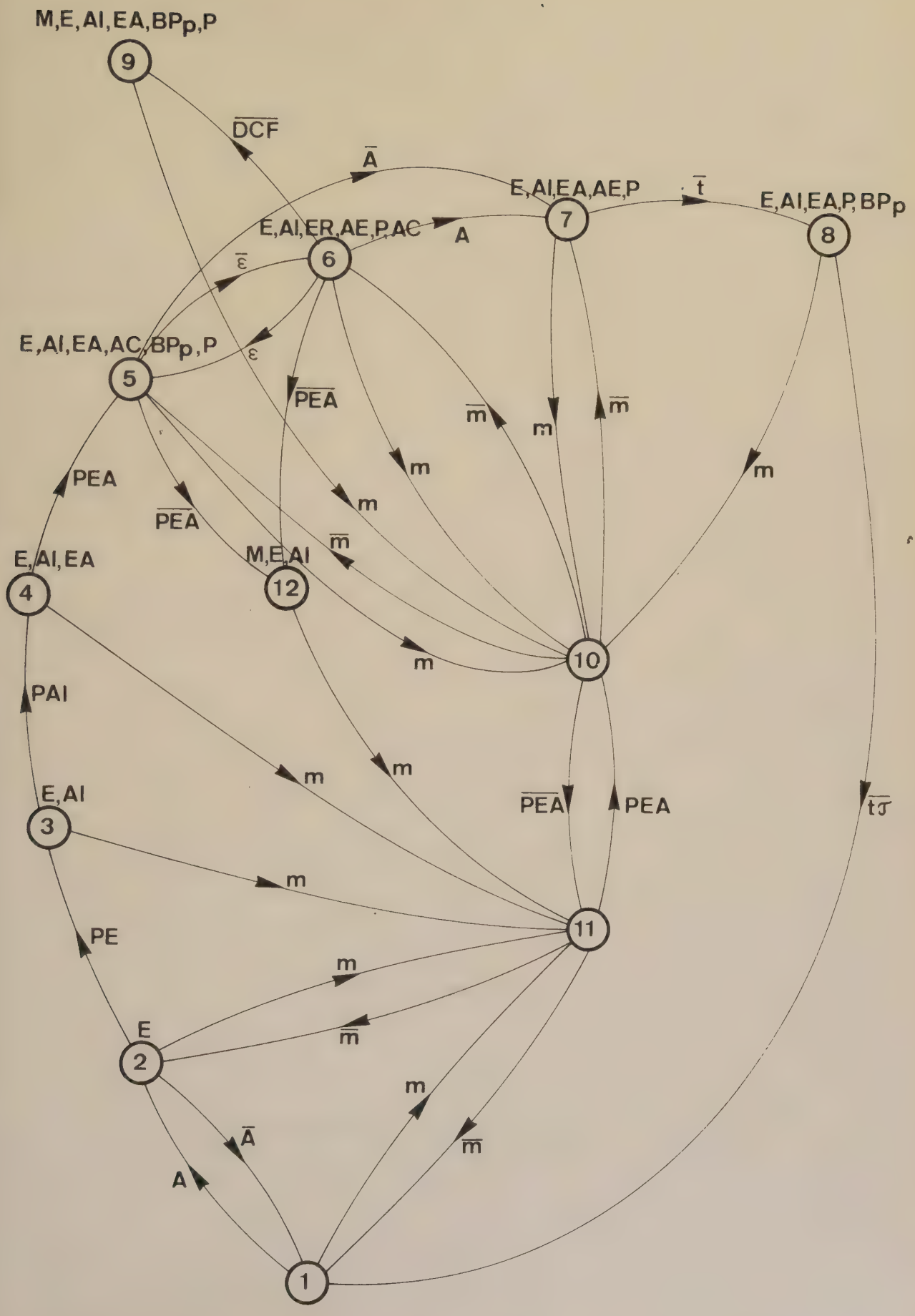


Fig 9.4. SA1 Sous séquence principale _ Echangeur

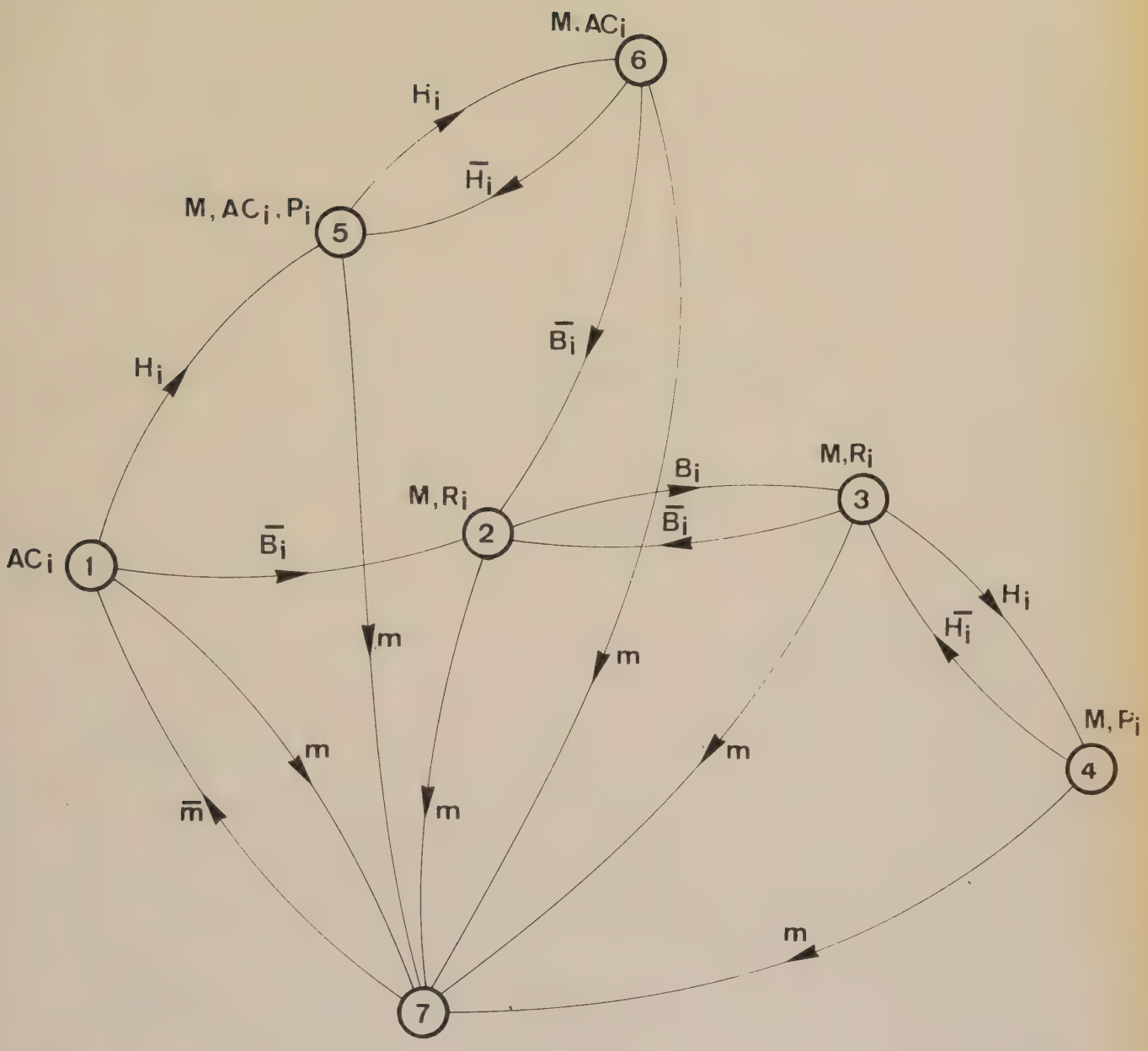


Fig9.5. sous-séquence securité ballon i Echangeur

Entrées

B_i	niveau bas ballon i
H_i	niveau haut ballon i
m	passage en fonctionnement manuel

Sorties

AC_i	autorisation de chauffage donnée par le ballon i
R_i	remplissage urgence ballon i
M	demande de passage en manuel
P_i	ouverture purge ballon i

Figure 9.6

Entrées

B	niveau bas bac froid
H	niveau haut bac froid
m	passage en fonctionnement manuel

Sorties

RF	arrivée eau froide
BP_f	ouverture by-pass BP1 et BP2
OF	ouverture circuit froid F1 et F2
M	demande de passage en manuel
PF	ouverture purge

Figure 9.7

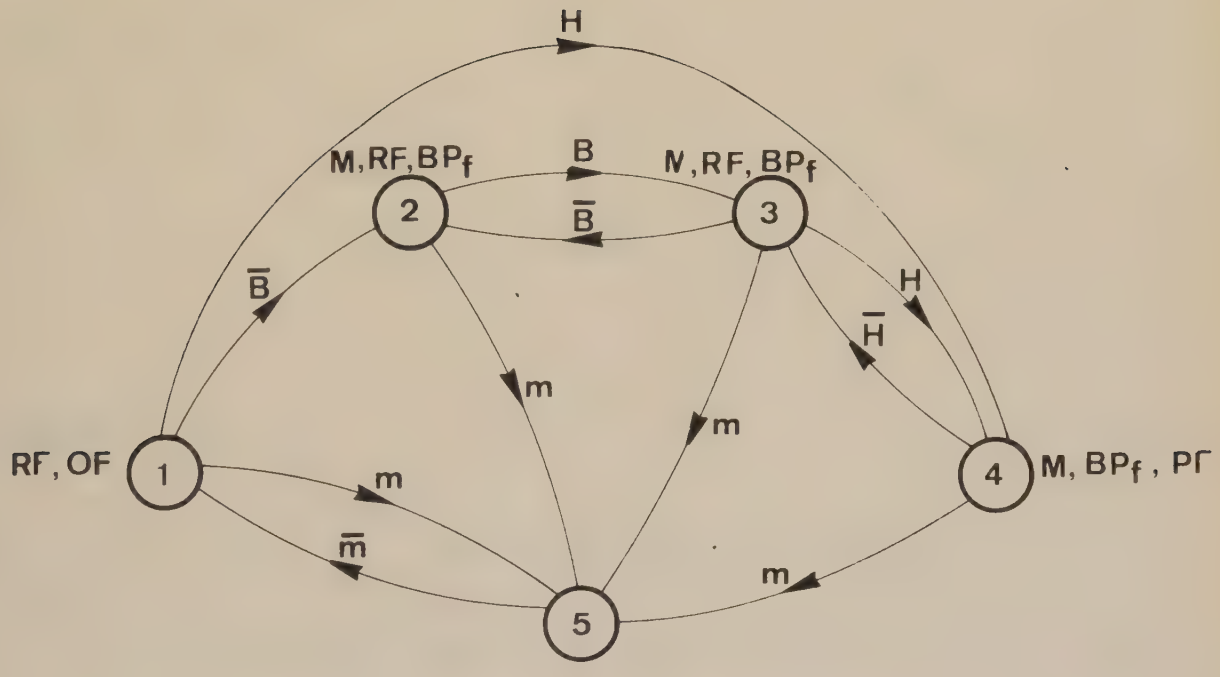
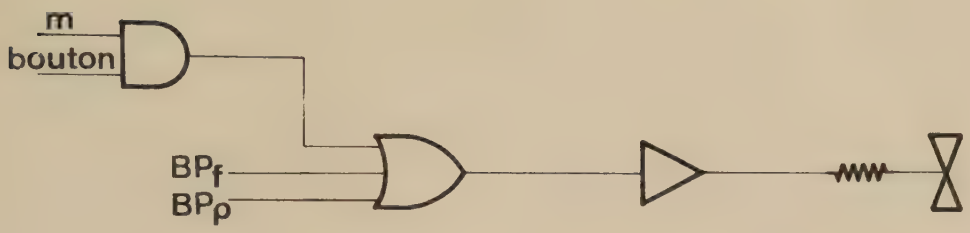
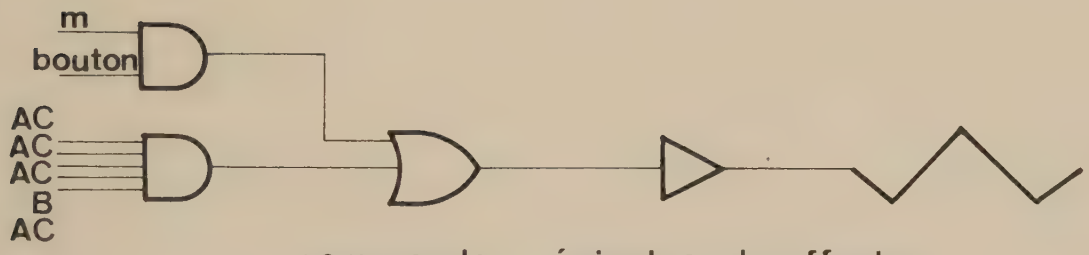


Fig 9.8. SA5 sous séquence sécurité bac froid

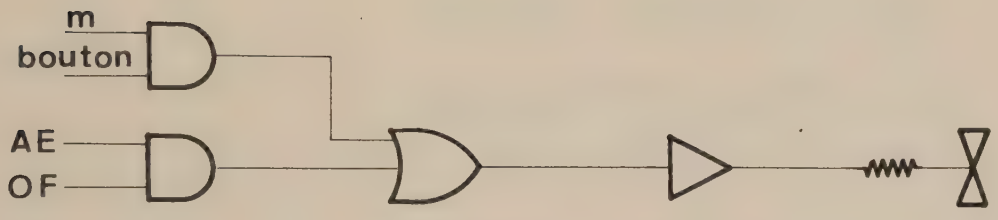
Fig. 2 visualisation demande de passage manuel



vannes by-passage échangeur BP1 , BP2



commande épingles chauffantes



vannes circuit eau froide F, F1, F2

commande pompe

Fig9.9. Sorties automate echangeur

A N N E X E 4

COMMANDE SEQUENTIELLE DE LA COLONNE A DISTILLER PILOTE DU LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE

Ce système a pour objectif la mise en route, la commande et l'arrêt automatiques de la colonne à distiller pilote du Laboratoire d'Automatique dont la description est donnée par la figure 10.1.

Ce processus comprenant un grand nombre d'éléments (bacs de réserve, ballons, électrovannes, pompes, mesure de températures ....), l'automate qui en assure le fonctionnement est complexe. Comportant au total 51 entrées et 45 sorties, il a été nécessaire de le décomposer en plusieurs sous-systèmes. Une méthode de partitions avait été utilisée par LEBOURGEOIS [7] pour trouver une indépendance maximale entre chaque sous-automate. Pour cette étude, nous nous sommes plus rapprochés des sous-ensembles physiques pour effectuer cette décomposition, cette dernière ayant alors l'avantage d'être plus facilement compréhensible. Finalement, seules cinq sorties de sous-systèmes sont utilisées comme entrées d'autres sous-systèmes. De plus, certaines entrées de l'automate sont des fonctions combinatoires des entrées réelles fournies par le processus, d'autres comportent un retard sur un certain front (en général celui de descente pour prolonger l'action d'une sortie après l'arrivée d'une information). Il en est de même pour les sorties de l'automate qui correspondent quelquefois à la commande de plusieurs actionneurs.

La partie principale de cet automate est consacrée à la commande automatique ; c'est-à-dire qu'à partir du bouton poussoir BPM de mise en route, l'automate réagit seul et commande toutes les actions, celles-ci pouvant d'ailleurs suivre plusieurs voies différentes en fonction de variables également affichées sur le pupitre de commande (U1, U2, U12, R ....)

D'autre part, pour des raisons de sécurité et aussi de très grande souplesse de fonctionnement, nous avons envisagé le cas d'un fonctionnement entièrement manuel avec la

possibilité de pouvoir passer en automatique à n'importe quel instant ou réciproquement, ce qui impose à l'automate de suivre l'évolution du système en fonctionnement manuel pour lui donner ainsi la possibilité de prendre le relais très facilement lors du passage en fonctionnement automatique.

Chaque sous-ensemble est défini par son graphe de fonctionnement où les noeuds sont répartis suivant trois groupes principaux :

. Noeuds α : ils définissent le fonctionnement du sous-automate en régime automatique

. Noeuds β : dans le fonctionnement automatique, ils demandent un passage en manuel car une anomalie prévue lors de la conception demande une intervention extérieure. L'opérateur doit obligatoirement passer en manuel pour effectuer la correction pour revenir ensuite en régime automatique s'il le désire.

. Noeuds γ : ce troisième groupe est caractéristique du régime manuel. Il doit être minimal et néanmoins suffisamment important pour contenir toutes les informations qui permettront un passage aisé dans l'ensemble α.

Chaque graphe est élaboré suivant les règles énoncées dans le chapitre 2, mais compte tenu de leur complexité, nous avons considéré en plus les limitations technologiques en vue d'une réalisation en circuits intégrés TTL. Les CUSA ainsi construites comporteront au maximum six entrées primaires et sept entrées secondaires. D'autre part, il est intéressant de diminuer au maximum le nombre de connexions en rendant sources tous les états du groupe γ.

En tenant compte de toutes ces considérations, l'organigramme général donnant la décomposition de l'automate est celui de la figure 10.2.

Sur cet organigramme, sont représentés les sept sous-automates suivants :

. SA1 : Alimentation générale du processus
. SA2 : Remplissage et vidange des bacs U1 et U2
. SA3 : Mise en température des bacs U1 et U2
. SA4 : Utilisation du bac U1
. SA5 : Utilisation du bac U2
. SA6 : Préchauffage colonne - Bouilleur - Reflux
. SA7 : Remélange des bacs W et D dans U1 ou U2

SA1. Alimentation générale du processus

Le graphe fonctionnel est celui de la fig.10.3 ; ses entrées et sorties sont données par le tableau de la fig.10.4. Les noeuds 1 à 13 appartiennent à l'ensemble α , 14 à 24 à l'ensemble β et 25 à 28 à l'ensemble γ.

Au départ, le processus est au repos : SA1 est dans l'état 1 ou 24 suivant que l'on désire un fonctionnement automatique ou manuel.

1. Fonctionnement automatique.

Dès que l'on appuie sur le bouton poussoir BPM, la tension électrique, l'air, l'eau et l'hydrogène se mettent sous pression dans cet ordre. Si l'une ou l'autre n'est pas arrivée au bout d'un temps déterminé, l'anomalie est visualisée (14, 15, 16 ou 17) ; sinon on est dans l'état 6 qui, avec sa sortie A, autorise les autres sous-séquences à entrer en fonctionnement.

On reste en 6 jusqu'au moment où la température de l'alcool dans le bouilleur atteint la valeur T1, ce qui provoque la mise sous pression de l'azote et le passage en 7 sinon en 17, si elle n'est pas apparue.

Ensuite, l'apparition du second seuil de température T2 va provoquer l'alimentation en eau du condenseur se trouvant en tête de colonne (passage de 7 en 8 puis en 9 et 10 sinon en 20).

L'état 10 correspond au régime de fonctionnement normal de la colonne.

C'est donc en général à partir de 10 que s'effectue l'arrêt progressif de la colonne si on relache le poussoir BPM à travers les états 11, 12, 13 puis 1 avec les variations $\overline{T2}$, $\overline{T1}$ et FC, cette dernière étant une fonction combinatoire de plusieurs entrées correspondant à l'arrêt effectif de toutes les autres sous-séquences.

D'autre part, à partir des états 7 ... 13, il est possible d'arrêter immédiatement le processus dans certains cas d'urgence ; ceux-ci sont de deux degrés différents:

. AUU correspond à une vidange immédiate de tous les bacs vers l'extérieur du bâtiment, y compris le bouilleur, au risque de le casser s'il est alors porté à une température élevée.

. AU correspond à une vidange immédiate de tous les bacs sauf le bouilleur pour lequel on attend une baisse de température suffisante afin d'éviter de le casser.

2. Fonctionnement manuel.

Si au départ on est en 25, l'arrivée de BPM nous conduit en 26. Nous serons ensuite en 27 ou 28 suivant le fonctionnement du processus que nous demandons. Ces quatre

états sont suffisants pour nous permettre d'aller facilement dans l'un des états de la séquence du régime automatique (sauf 3, 4, 5 et 6 qui correspondent à la mise en route des alimentations dans un ordre bien déterminé et qui risque de ne pas être le même en automatique).

Finalement, ce système comporte 19 entrées, 17 sorties et 28 états. On peut vérifier que 1, 25, 26, 27 et 28 sont des états-sources.

SA2. Remplissage et vidange des bacs U1 et U2

Cette sous-séquence est la plus importante de l'automate puisqu'elle détermine tous les modes de fonctionnement du processus considéré (figures 10.5 et 10.6).

noeuds de l'ensemble α : 1 à 41
" " " β : 42 à 49
" " " γ : 50 à 57

1. Fonctionnement automatique

Au repos, SA2 est dans l'un des quatre états 2, 3, 5 ou 6 suivant que les bacs extérieurs sont tous pleins ou que l'un des deux, UF1 ou UF2 est vide ou que les deux sont vides..

Quand apparaît l'ordre A donné par SA1, on passe dans les états 1, 4, 27 ou 28, ce qui autorise le commencement de la séquence quand apparaît UB1 ou UB2 (ces entrées pouvant apparaître pratiquement avant l'apparition de A ; elles seront néanmoins conditionnées par A de façon à limiter le nombre d'états).

Prenons le cas de UB1 :

On peut demander UB1 de 4 ou 27 (de 1 ou 28, il conduit à un fonctionnement impossible si on n'a pas d'alcool)

Suivant que le bac U1 est déjà plein (vidange non effectuée lors de la manipulation précédente) ou non, on est conduit dans l'un des états 11, 15, 17, 19 ou 21. Dans le cas où U1 était vide au départ, on le remplit jusqu'à ce que le niveau d'alcool atteigne la limite supérieure. On signale que la mise en température de U1 commence seulement quand l'alcool atteint le niveau limite inférieur.

Quand le bac U1 est plein, on se trouve dans l'un des trois états 15, 17 ou 21 pour lesquels on donne l'autorisation de fonctionnement à SA4 par l'intermédiaire de la sortie B1.

De chacun de ces trois états, deux possibilités sont envisageables :

. On arrête l'utilisation de U1 et on revient au point de départ après l'avoir vidangé ou non.
. On a demandé le remplissage des deux bacs. A ce moment, cette demande devient bien effective, si bien que l'on traverse les noeuds 19, 29, 31 et 33.

En 29, 31 ou 33 on arrive donc dans la position où les deux bacs sont considérés comme pleins et où le bac U1 est utilisé. En 30, 32 ou 34 on est dans le cas de fonctionnement exactement symétrique où le bac U2 est utilisé (la marche à suivre pour y arriver est la même que celle qui vient d'être expliquée).

Revenons en 29, 31, 33. La seule manière d'évoluer est de demander l'arrêt de fonctionnement du bac U1. On arrive ainsi en 39 directement ou non, suivant que les bacs de tête

ou de pied sont vides ou non. Dans le cas où ils contiennent une certaine quantité de liquide, il est nécessaire de la transporter dans le bac U1 pour garder la concentration de chaque produit car, suivant les opérations qui vont suivre, il deviendrait alors impossible de déterminer leur provenance.

Il est possible ensuite de demander l'utilisation de U2 immédiatement ou non après avoir cessé de demander celle de U1, ce qui nous fait passer en 35 ou 37 suivant que les bacs W et D sont vides ou non.

Les états symétriques de 36 et 37 sont 36 et 38 dans le cas d'utilisation de l'autre bac.

L'état 39 est un état commun aux deux séquences. C'est à partir de lui que l'on pourra commencer la vidange des bacs dans l'ordre U1 puis U2. Si au contraire, on laisse pleins ces deux bacs, on reste dans cet état tant que dure l'entrée A.

2. Fonctionnement manuel

Le fonctionnement manuel est inclus dans les états 50 à 57.

SA2 comporte 15 entrées, 12 sorties et 59 états. Les états 2, 3, 5, 6, 50, 51, 52, 53, 54, 55 et 56 sont sources, ce qui permet de diminuer considérablement le nombre de connexions.

SA3. Mise en température des bacs U1 et U2

Ce sous-automate assure la mise en température de l'un ou l'autre des bacs U1 et U2 avec toute la sécurité nécessaire quant aux niveaux de température (Figures 10.7 et 10.8).

noeuds de l'ensemble α : 1 à 17
" " " β : 18 à 22
" " " γ : 23 à 27

1. Fonctionnement automatique

La mise en température de U1 s'effectuant de la même manière que celle de U2, le sous-automate SA3 en assurant le fonctionnement possède une allure symétrique. Il est néanmoins intéressant de les représenter ensemble, certains états pouvant être mis en commun (1, 2, 3, 18 et 23).

Considérons par exemple le cas où on met le bac U1 en température.

Au repos, le système est dans l'état 1; quand apparaît l'information A, il est transporté en 2 si le bouilleur est plein de liquide, sinon en 3 (le niveau du liquide dans le bouilleur est important ici puisque pour le remplissage de ce dernier, l'alcool passe par le circuit de mise en température. Ce niveau peut être en position haute si on n'avait pas effectué de vidange lors de la manipulation précédente).

Quand apparaît l'une ou l'autre des deux informations mt1 ou B1 élaborées par SA2, on évolue vers 8, 10, 12 ou 14 ; pour 8 et 10, on n'a que mt1 (U1 n'est pas plein) si bien que l'on utilise la pompe de mise en température pour prendre du liquide froid venant de UF1. On cumule ainsi l'opération de mise en température avec celle de remplissage de U1. B1 intervenant toujours en dernier par rapport à mt1, les états finaux de fonctionnement normal sont 12 et 14. Si quand on est dans ces états, la température atteint le seuil supérieur TMT, on arrête MT1 et on demande l'intervention de l'opérateur.

De ces états, l'information B1 peut également être interrompue ; on est alors conduit dans l'état 16 pour lequel on garde MT1 jusqu'à la baisse de température à T2 du liquide du bouilleur ; en effet, jusqu'à cette valeur, le liquide peut s'évaporer dans le bouilleur et il devient nécessaire de le remplacer pour garder le niveau NFB. De 16, on peut également aller en 13 et 15, états symétriques de 12 et 14 quand apparaît l'information B2.

2. Fonctionnement manuel.

Celui-ci est limité aux états 23, 24 et 26 suffisants pour permettre un passage facile d'automatique en manuel et réciproquement.

En conclusion, SA3 comporte 9 entrées, 7 sorties et 27 états. Les états 1, 23, 24, 25, 26, 27 sont six états sources (à condition de leur ajouter quelques variables pour les différencier complètement les uns des autres).

23	$\overline{mt1}$	$\overline{B1}$
24	-	B1
26	mt1	$\overline{B1}$

24-26	$\overline{B2}$	-	mt1
25-27	-	$\overline{B1}$	mt2

SA4. Utilisation du bac U1

Cette séquence SA4 est petite mais néanmoins importante puisqu'elle est utilisée un grand nombre de fois dans la sous-séquence SA4. Sa fonction principale est d'assurer toutes les sécurités de fonctionnement du bac U1 quand il est utilisé (figures 10.9 et 10.10).

Partant de l'état de repos 1, on passe en 2 sous l'action de B1 si le bac U1 est plein (NH1 = 1), sinon directement en 3. U1 étant utilisé pour alimenter le bouilleur, son niveau diminue régulièrement jusqu'au moment où étant complètement vide, il devient nécessaire de le remplir en remélangeant les bacs W et D si celui-ci n'avait pas été demandé en continu dès le commencement de la manipulation.

Si au bout d'un certain temps, le niveau NB1 n'est pas revenu, il devient nécessaire de faire intervenir l'opérateur et de couper aussitôt le chauffage du bouilleur (état 6).

L'état h est le seul état correspondant au fonctionnement manuel pour cette sous-séquence.

SA4 comprend donc 5 entrées, 3 sorties et 7 états dont 2 sont sources (1 et 7).

SA5. Utilisation du bac U2

Quand on utilise le bac U2, la sous-séquence SA5 remplit des fonctions de sécurité identiques à SA4 précédemment définie (figures 10.11 et 10.12).

SA6. Préchauffage colonne - Bouilleur - Reflux

Cette sous-séquence assure le remplissage et la mise en température du bouilleur. Elle est munie de nombreuses sécurités (Figures 10.13 et 10.14).

Noeuds de l'ensemble α : 1 à 22
" " " β : 23 à 24
" " " γ : 25 à 29

1. Fonctionnement automatique

Partant de l'état de repos 1, on passe en 2 dès l'apparition de A si le bouilleur est vide, sinon en 3 (bouilleur laissé plein à la manipulation précédente).

En 2, il faut donc remplir le bouilleur à partir du liquide contenu dans le bac extérieur correspondant et commander le chauffage maximum du circuit de préchauffage afin d'avoir une mise en température la plus rapide possible. Quand le liquide dans le bouilleur a atteint son niveau supérieur, on passe en 3, ce qui commande la chauffe maximum par les aiguilles chauffantes. Celle-ci dure alors jusqu'au niveau de température T2 dans le bouilleur. Si pendant cette montée en température, le niveau du liquide dans le bouilleur baisse, on arrête momentanément la chauffe pour remettre du liquide par l'intermédiaire d'une vanne placée en parallèle sur le débitmètre de préchauffage.

A partir de la température T2, on alimente régulièrement le bouilleur en liquide, chaque circuit ayant un chauffage moyen.

Le fonctionnement de la colonne devient normal quand le liquide étant à son niveau supérieur, la température est au niveau T3 et il y a un certain débit de tête.

Ces trois variables sont surveillées étroitement et des variations anormales conduisent rapidement à un arrêt du chauffage et à une intervention nécessaire de l'opérateur (état 23).

Quand on arrête les manipulations sur la colonne (c'est-à-dire que l'on relache le poussoir BPM), on arrête immédiatement le chauffage.

Le seul travail consiste alors à maintenir haut le niveau du liquide dans le bouilleur jusqu'à la température basse T1 pour procéder ensuite à la vidange si celle-ci a été demandée. (Le niveau haut doit être maintenu tant que la température est élevée, afin de ne pas détériorer la partie de la colonne entourant des épingles chauffantes qui ont une grande capacité calorifique).

2. Fonctionnement manuel

Celui-ci est constitué par les états 25, 26, 27, 28 et 29.

SA6 comporte 15 entrées, 12 sorties et 30 états. Les états 1, 25, 26, 27, 28 et 29 sont des états sources.

SA7. Remélanges des bacs UW et UD

Cette dernière sous-séquence surveille le niveau du liquide dans les bacs W et D de pied et de tête en fonction de plusieurs consignes prédéfinies (Figures 10.15 et 10.16).

noeuds de l'ensemble α : 1 à 21
" " " β : 22 à 25
" " " γ : 26 à 31

1. Fonctionnement automatique

La régulation des niveaux dans UW et UD fait intervenir les deux bacs U1 et U2, c'est pourquoi SA7 a une allure symétrique semblable à SA3.

SA7 peut fonctionner en remélange continu ou non, ce qui est sélectionné par le bouton poussoir R.

Prenons donc le système dans son état 2 de repos, quand est apparue l'information A. Si on demande rapidement la fonction R, on passe en 3 sinon on attend UB1 ou UB2 pour se positionner en 5 ou en 4.

On peut également demander R après UB1 ou UB2 (19 ou 18), ou inversement, ou même les deux simultanément. Par contre, on ne peut plus demander R en cours de fonctionner ; il reste néanmoins possible de la rendre ineffective à un certain moment.

Dans le cas où l'on demande le remélange continu, celui-ci s'effectue pratiquement par épisodes pour ne pas bloquer les tuyauteries correspondantes qui sont utilisées également pour le remplissage des bacs U1 ou U2 à partir de leurs bacs extérieurs, le remélange étant toujours prioritaire par rapport au remplissage à partir des bacs extérieurs. Le système évolue donc périodiquement entre 17 et 19 ou 18 et 16, le front descente de NBWD étant muni d'un certain retard qui déterminera l'intervalle de temps pendant lequel s'effectuera ce remélange.

Si on n'a pas demandé R, il est normal que le niveau monte régulièrement dans chacun des deux bacs. Cette évolution cesse dès que l'un des deux bacs W ou D a atteint son niveau supérieur et l'on procède alors au remélange de ces deux bacs dans U1 ou U2 suivant que l'un ou l'autre est en fonctionnement.

L'opérateur intervient manuellement si le remélange ne peut s'effectuer totalement dans U1 ou U2 qui a atteint son niveau supérieur.

D'autre part, quand cesse l'utilisation d'un bac, il y a obligatoirement remélange dans ce dernier avant de revenir dans un état de repos.

2. Fonctionnement manuel

Partant de 26 on va successivement dans les états 28 et 30 ou 27 et 29 suivant que l'on utilise U1 ou U2. 31 correspond à la demande initiale de R.

Ce sous-automate comporte au total entrées, sorties et 31 états.

De plus les états 1, 26, 27, 28, 29, 30 et 31 sont des états sources.

1	$\overline{m}$	A	$\overline{VB1}$	$\overline{UB2}$	$\overline{R}$	$\overline{NBWD}$
25	$\overline{m}$	$\overline{A}$	-	-	-	-
26	m	-	$\overline{UB1}$	$\overline{UB2}$	$\overline{R}$	-
27	m	A	$\overline{UB1}$	UB2	$\overline{R}$	-
28	m	A	UB1	$\overline{UB2}$	$\overline{R}$	-
29	m	A	$\overline{UB1}$	UB2	R	-
30	m	A	$\overline{UB1}$	$\overline{UB2}$	R	-
31	m	A	$\overline{UB1}$	$\overline{UB2}$	R	-

L'automate complet comporte 51 entrées et 45 sorties rappelées sur le tableau de la figure 10.17. Les sorties réelles pour le processus sont au nombre de 43. La description de ces entrées et sorties est donnée sur les figures 10.18 et 10.19. (On donne les cas les plus complexes).

Avec tous les sous-systèmes, l'automate comporte 191 états. On peut résumer rapidement son fonctionnement sous la forme suivante :

Au repos tous les sous-systèmes sont dans leur état de repos. Dès que l'on appuie sur BPM (bouton poussoir mise en marche), les diverses alimentations se déclenchent les unes

après les autres dans SA1. La mise sous pression de l'ensemble provoque alors la possibilité de fonctionnement des autres sous-séquences. Les divers bacs se remplissent en suivant certaines conditions affichées et la régulation par calculateur peut commencer quand la mise en température devient correcte. Pendant ce temps, l'automate surveille tous les points de fonctionnement délicats pour déclencher une alarme et une demande de passage en manuel dès que toutes les conditions ne sont plus remplies.

La dernière partie importante est l'arrêt du processus. Dès que l'on relâche BPM, le processus retourne vers son état de repos en suivant plusieurs consignes élaborées à l'avance.

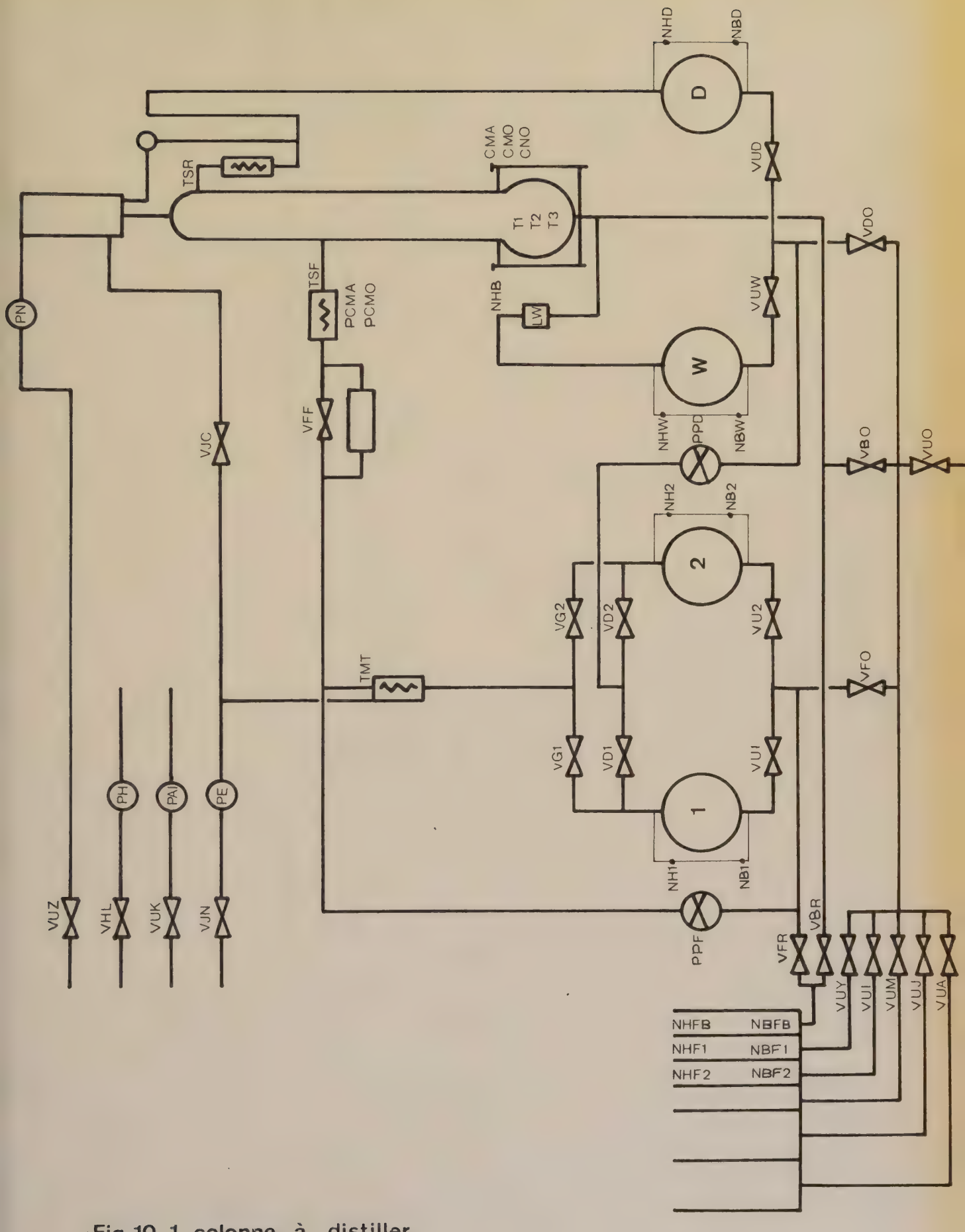


Fig 10.1. colonne à distiller

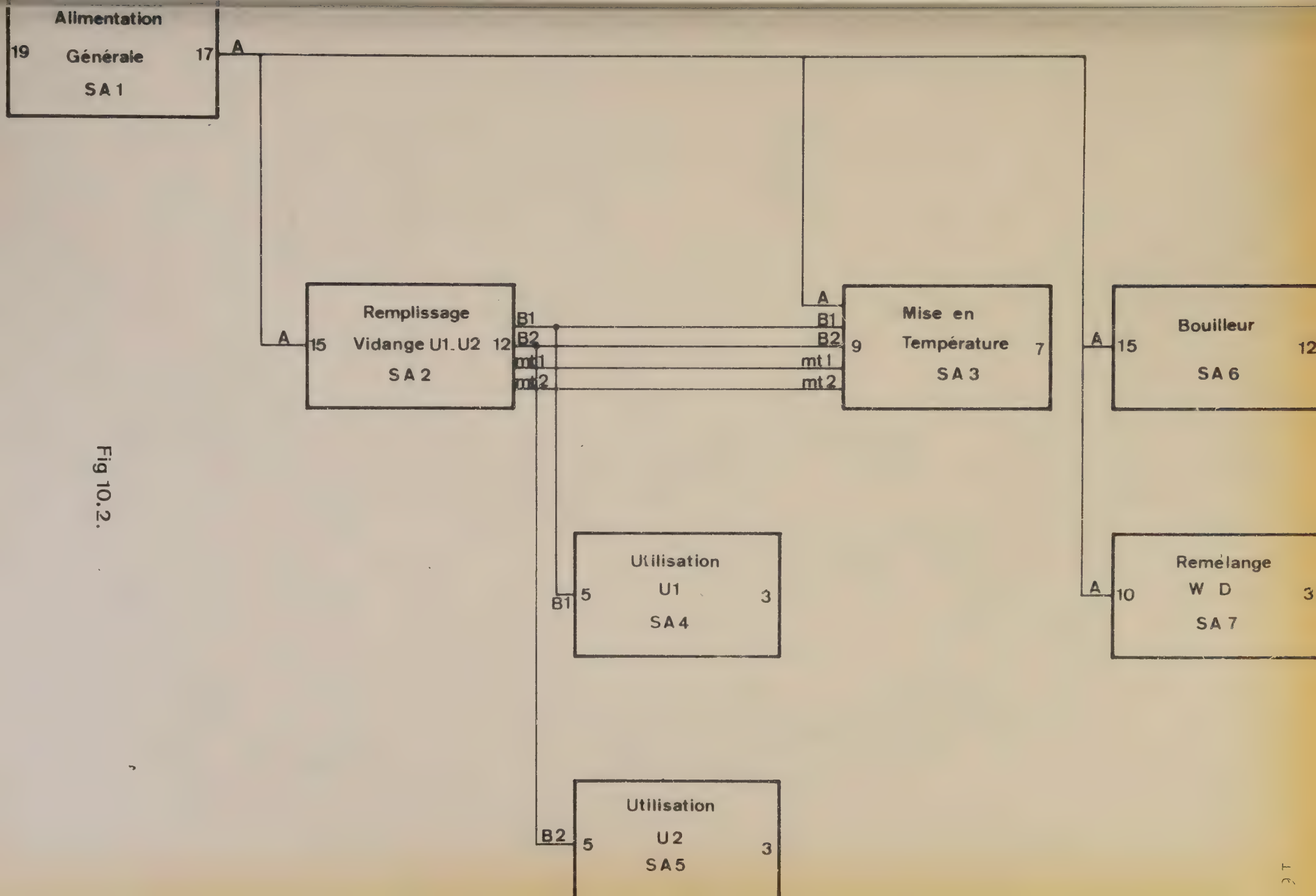

Alimentation
19
Générale
17
A
SA 1
Remplissage
Vidange U1_U2
SA 2
15
12
B1
B2
mt1
mt2
Mise en
Température
SA 3
9
7
Bouilleur
SA 6
15
12
Utilisation
U1
SA 4
5
3
Utilisation
U2
SA 5
5
3
Remélange
W D
SA 7
10
3

Fig 10.2.

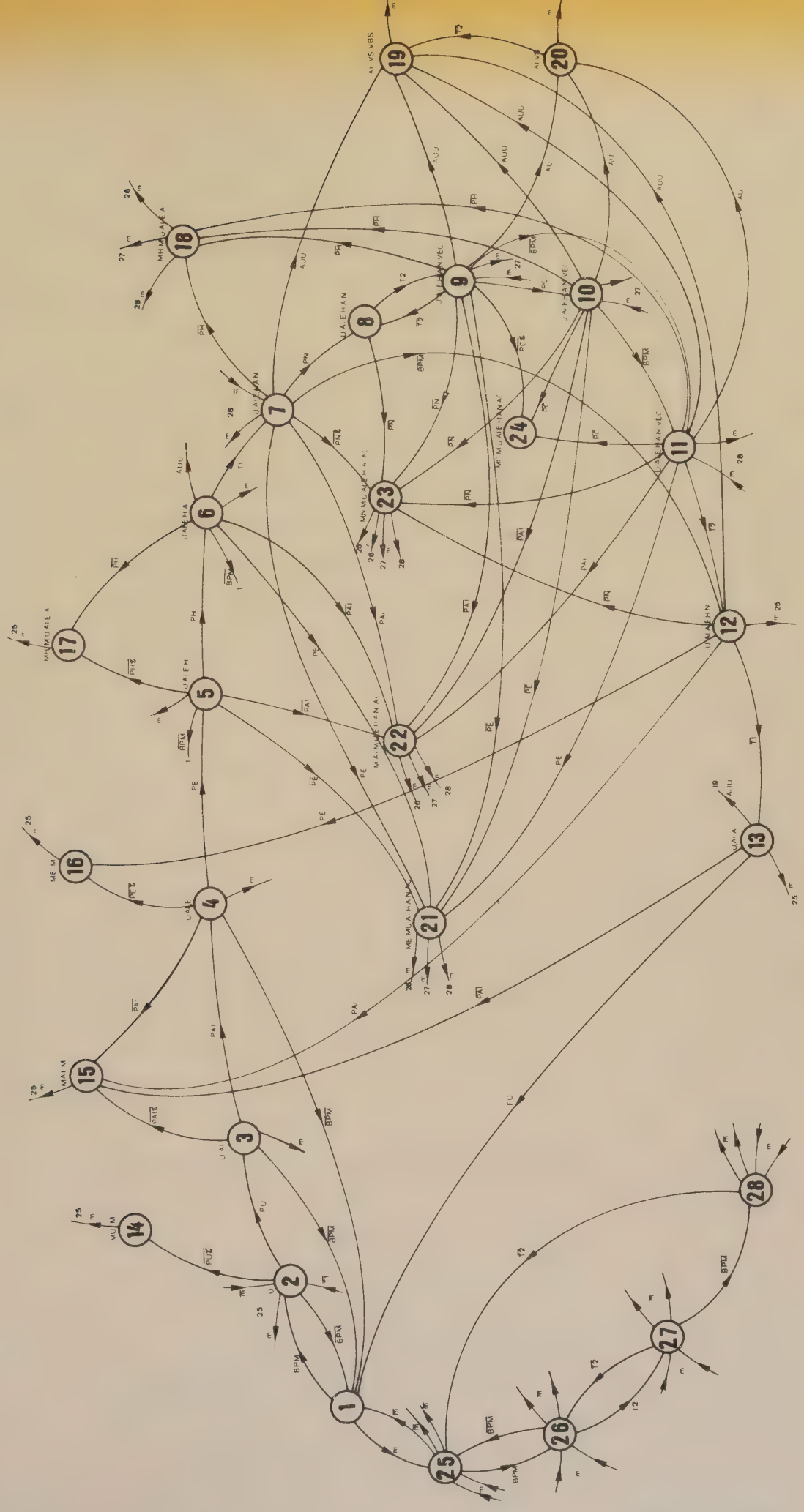


Fig 10.3. SA1

SA1. Alimentation générale du processus

Entrées (19)

m : "fonctionnement manuel" de l'automate (bouton poussoir)
BPM : bouton poussoir de "mise en marche"
FC : fin de cycle de l'automate
AU : bouton poussoir "arrêt urgence"
AUU : bouton poussoir "arrêt urgence priorité absolue"
T1 : température basse du bouilleur
T2 : température moyenne du bouilleur
PU : présence de tension
PUτ : présence de tension avec retard
PAI : pression Air
PAIτ :
PE : pression Eau
PEτ :
PH : pression hydrogène
PHτ :
PN : pression Azote
PNτ :
PC : pression d'eau du condenseur
PCτ :

Sorties (17)

U : Alimentation en courant électrique
AI : " " air
E : " " eau
H : " " hydrogène
N : " " azote
VEC : " " eau du condenseur
A : Autorisation de fonctionnement des autres sous-séquences

MU	:	visualisation manque de courant
MAI	:	" " d'air
ME	:	" " d'eau
MH	:	" " d'hydrogène
MN	:	" " d'azote
MC	:	" " d'eau au condenseur
M	:	demande de passage en fonctionnement manuel
AC	:	arrêt de chauffage dans le bouilleur
VS	:	vidange rapide des ballons
VBS	:	vidange rapide du contenu du bouilleur

Figure 10.4

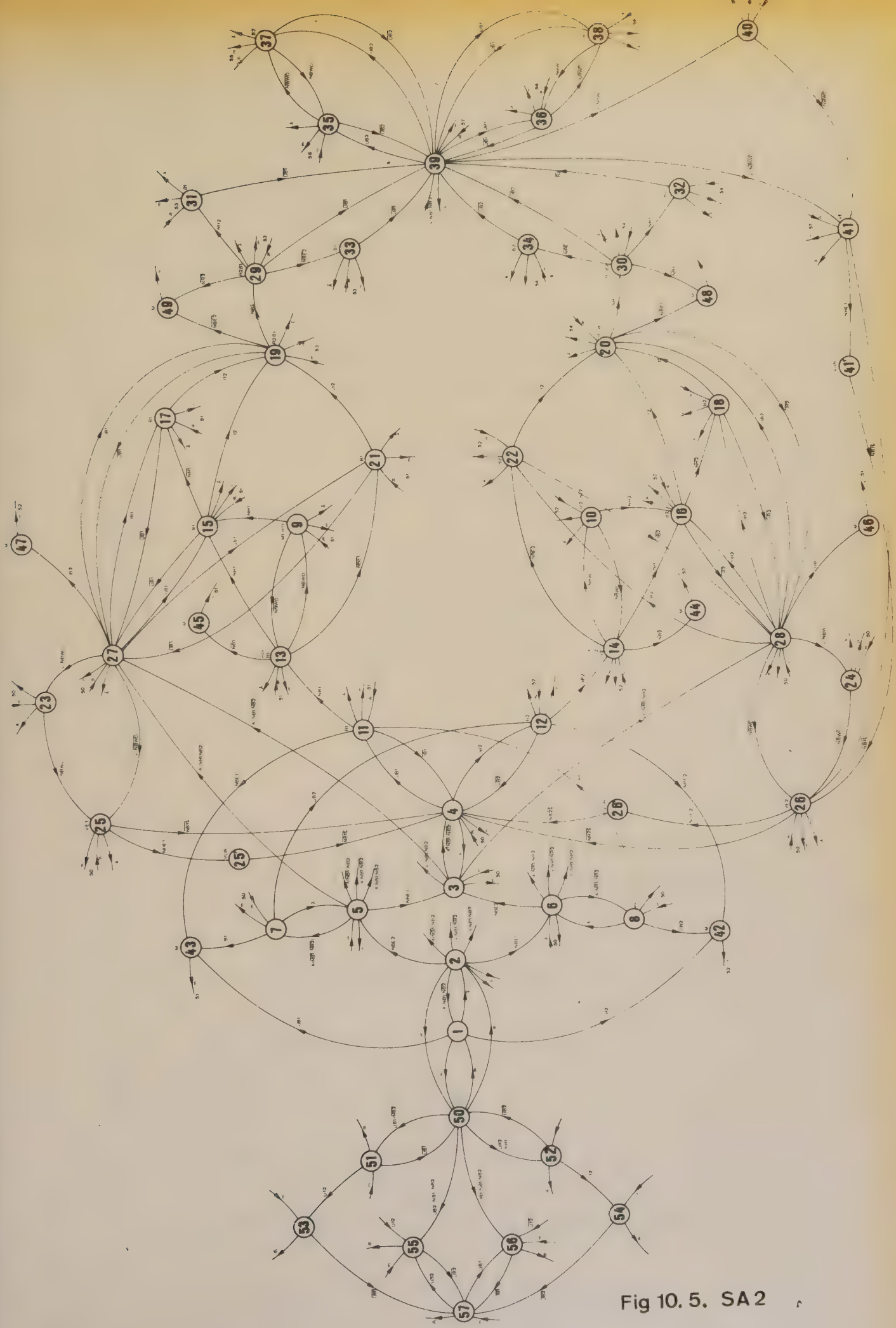


Fig 10. 5. SA 2

SA2. Remplissage et vidange des bacs U1 et U2

Entrées (15)

A : Autorisation de fonctionnement automatique
m : Bouton poussoir fonctionnement manuel
UB1 : " " utilisation du bac U1
UB2 : " " utilisation du bac U2
U12 : " " remplissage des deux bacs U1 et U2
V : " " vidange des deux bacs U1 et U2
NB1 : Niveau bas U1
NB2 : " " U2
NBE1 : " " bac extérieur UF1
NBE2 : " " bac extérieur UF2
NBWD : " " ballons UW et UD
NH1 : " haut U1
NH2 : " " U2
NHE1 : " " UF1
NHE2 : " " UF2

Sorties (12)

M : Demande de passage en fonctionnement manuel
R1 : Remplissage U1
R2 : " U2
mt1 : Possibilité de mise en température du bac U1
mt2 : " " " " U2
B1 : Utilisation U1
B2 : Utilisation U2
VE1 : Vidange de U1 vers UF1
VE2 : " U2 vers UF2
M1 : Remélange de UW et UD dans U1
M2 : " UW et UD dans U2
VUR : Vidange dans le réservoir complémentaire

Figure 10.6

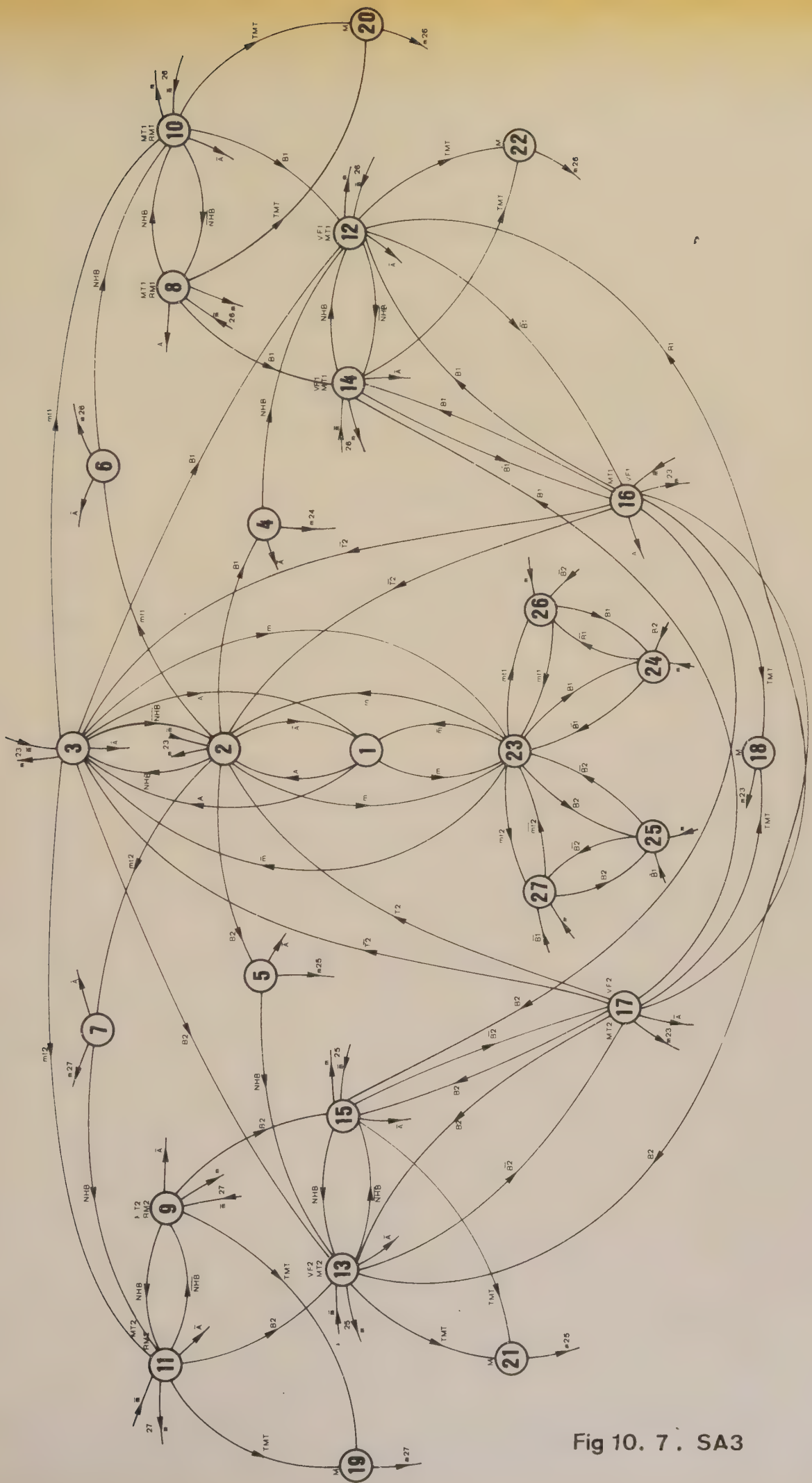


Fig 10. 7 . SA3

SA3. Mise en température des bacs U1 et U2

Entrées (9)

m : Bouton poussoir fonctionnement manuel
A : Autorisation de fonctionnement automatique
mt1 : Possibilité de mise en température du bac U1
mt2 : " " " " "v " " U2
B1 : Bac U1 en fonctionnement normal
B2 : " U2 " "
NIB : Niveau haut du liquide dans le bouilleur
T2 : Température moyenne dans le bouilleur
TMT : Température du liquide dans la boucle de mise en température

Sorties (7)

M : Demande de passage en fonctionnement manuel
MT1 : Mise en température du bac U1
MT2 : " " " " " U2
RM1 : Remplissage de U1 par la boucle de mise en température
RM2 : " " U2 " " " "
VF1 : Circuit U1 en boucle fermée
VF2 : " U2 " " "

Figure 10.8

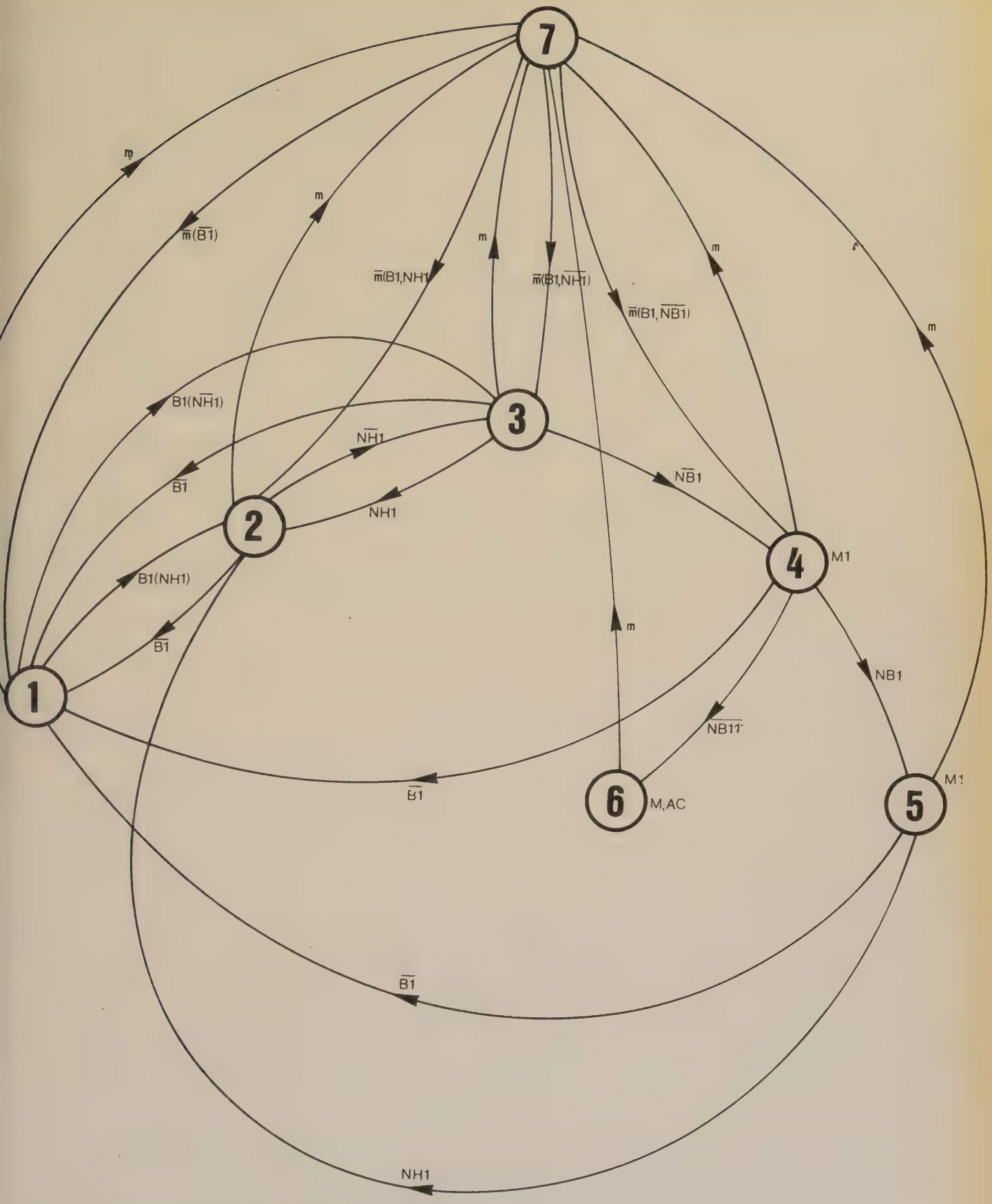


Figure 10.9. SA4

SA4. Utilisation du bac U1

Entrées (5)

m : Bouton poussoir fonctionnement manuel
B1 : Bac U1 en fonctionnement normal
NB1 : Niveau bas du bac U1
NB1τ : " " " " " retardé
NH1 : " haut " " "

Sorties (3)

M : Demande de passage en fonctionnement manuel
AC : Arrêt du chauffage dans le bouilleur
M1 : Remélange des bacs UW et UD dans U1

Figure 10.10

SA5. Utilisation du bac U2

Entrées (5)

m : Bouton poussoir fonctionnement manuel
B2 : bac U2 en fonctionnement normal
NB2 : Niveau bas du bac U2
NB2τ : Niveau bas du bac U2 retardé
NH2 : Niveau haut du bac U2

Sorties (3)

M : Demande de passage en fonctionnement manuel
AC : Arrêt du chauffage dans le bouilleur
M1 : Remélange des bacs UW et UD dans U2

Figure 10.12

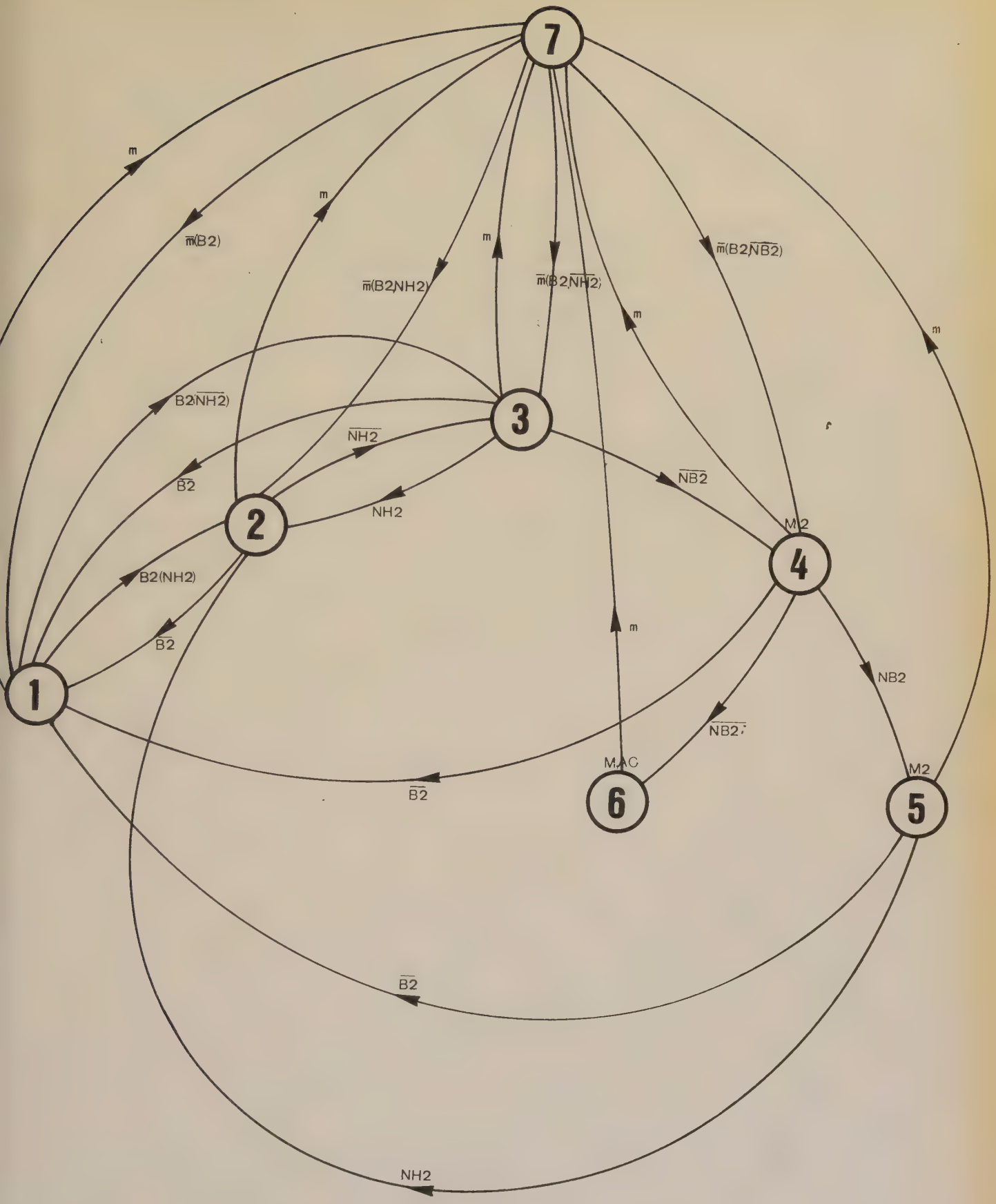


Figure 10.11. SA5

Fig 10. 13. SA6

SA6. Préchauffage colonne - Bouilleur - Reflux

Entrées (15)

A : Autorisation de fonctionnement automatique
m : Bouton poussoir "fonctionnement manuel"
BPM : " " "mise en marche"
LW : débit de pied
NHB : Niveau haut du liquide dans le bouilleur
NHBT : " " " " " " avec retard
NBFB : Niveau bas dans le réservoir extérieur alimentation bouilleur
NHFB : Niveau haut dans le réservoir extérieur alimentation bouilleur
NHD : Niveau haut dans le circuit de reflux
T1 : Température basse dans le bouilleur
T2 : " moyenne dans le bouilleur
T3 : " haute " " "
TSF : " circuit préchauffage
TSR : " circuit reflux
V : Bouton poussoir "vidange"

Sorties (12)

M : Demande de passage en fonctionnement manuel
PP : Possibilité de préchauffage
PR : " " chauffage circuit de reflux
PCMA : Préchauffage maximum
PCMO : " moyen
CMA : Chauffage bouilleur maximum
CMO : " " moyen
CNO : " " normal
VBM : Vidange bouilleur
VUR : " " vers réservoir supplémentaire
VFF : Vanne en shunt sur le débitmètre préchauffage
RB : Remplissage bouilleur

Figure 10.14

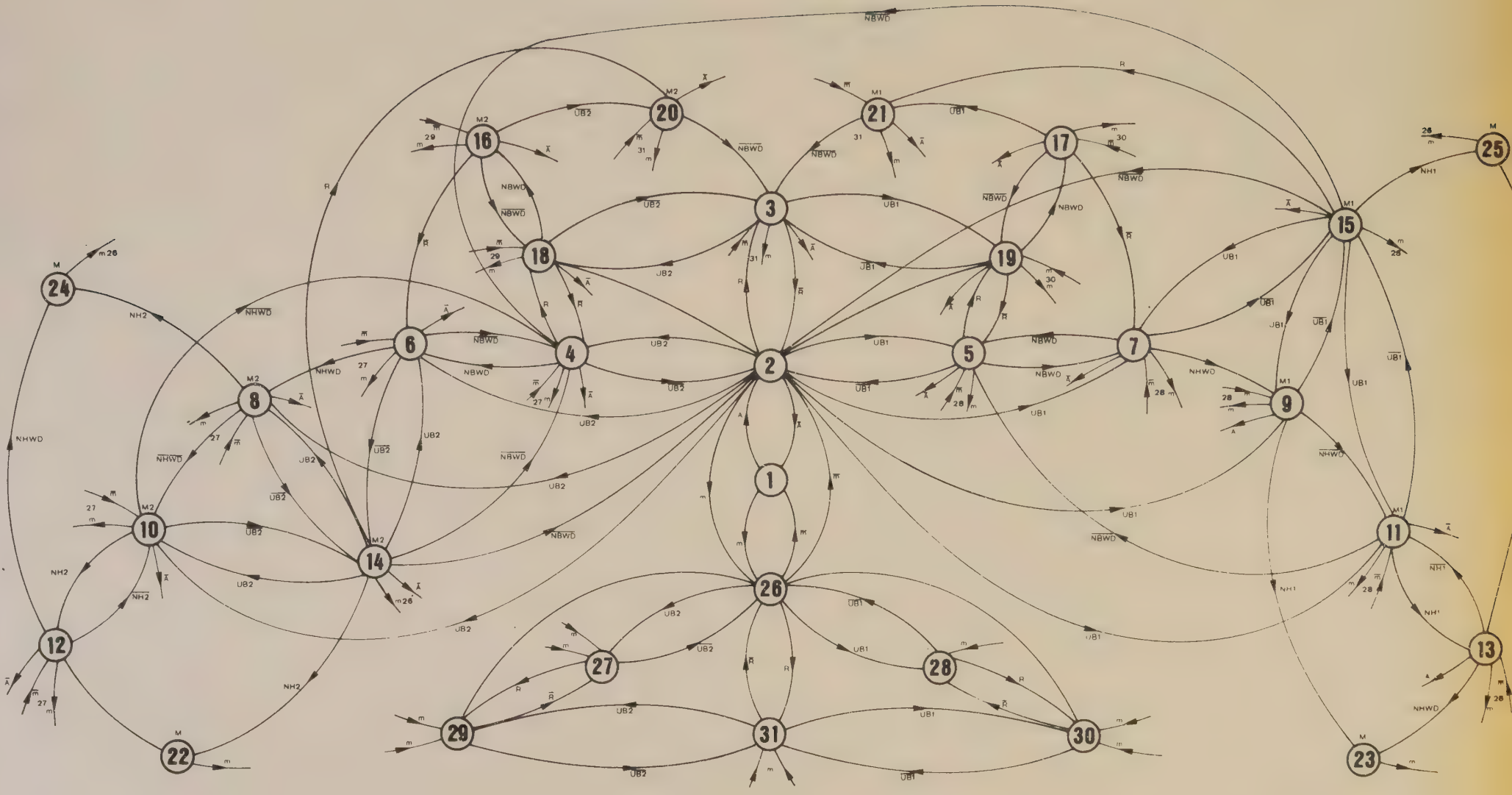

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
NBWD
UB2
UB1
NHWD
NH2
NH1
M
M1
M2

Fig 10.15. SA7

SA7. Remélanges des bacs UW et UD

Entrées (10)

A	:	Autorisation de fonctionnement automatique
m	:	Bouton poussoir fonctionnement manuel
UB1	:	" " utilisation bac U1
UB2	:	" " " " U2
R	:	" " demande de remélange continu
V	:	" " vidange de tous les bacs
NBWD	:	Niveau bas des bacs UW et UD
NHWD	:	" haut du " UW ou UD
NH1	:	" " " " U1
NH2	:	" " " " U2

Sorties (3)

M	:	Demande de passage en fonctionnement manuel
M1	:	Remélange de UD et UW dans U1
M2	:	" " UD et UW " U2

(M1 et M2 sont prioritaires devant R1 et R2)

Figure 10.16

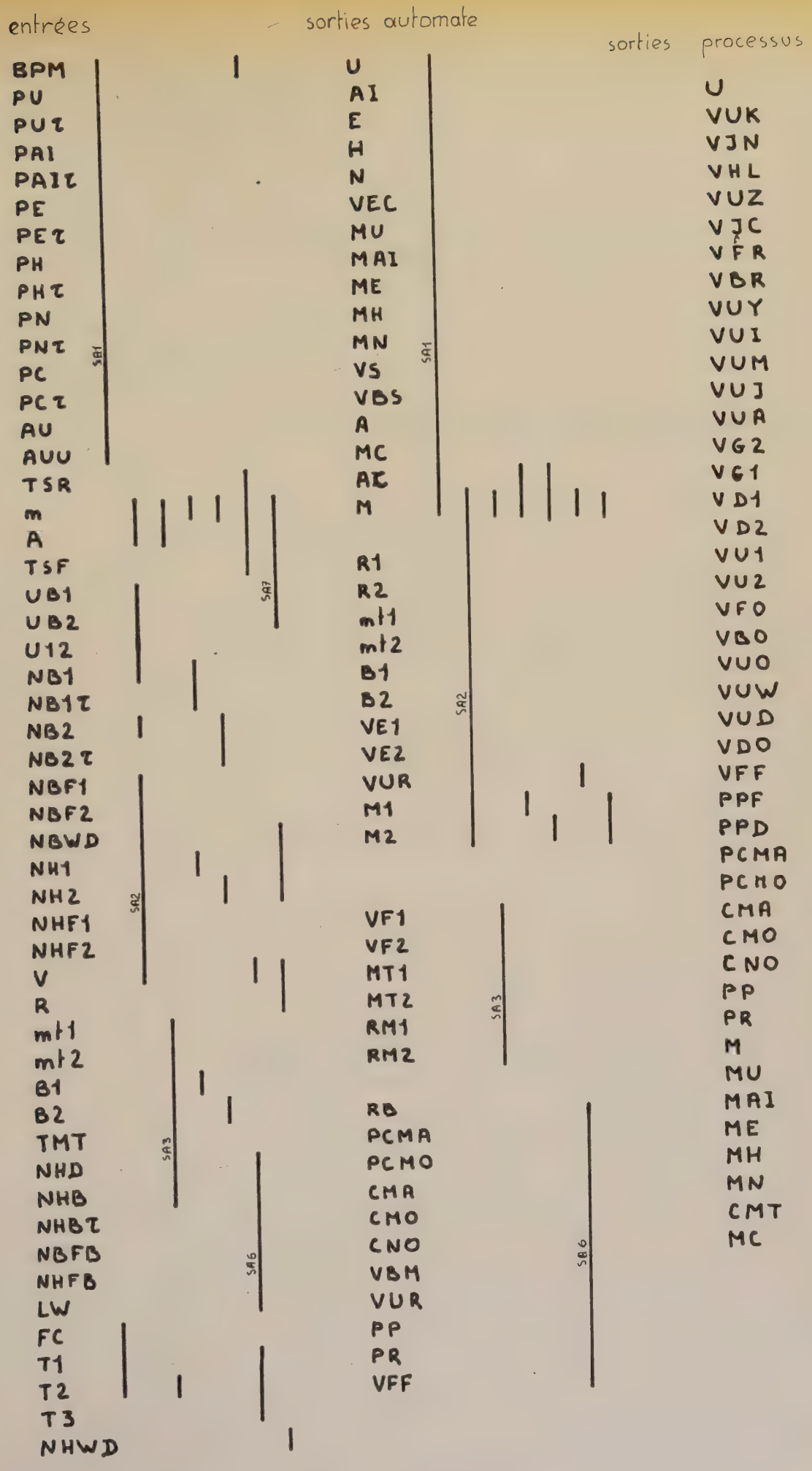
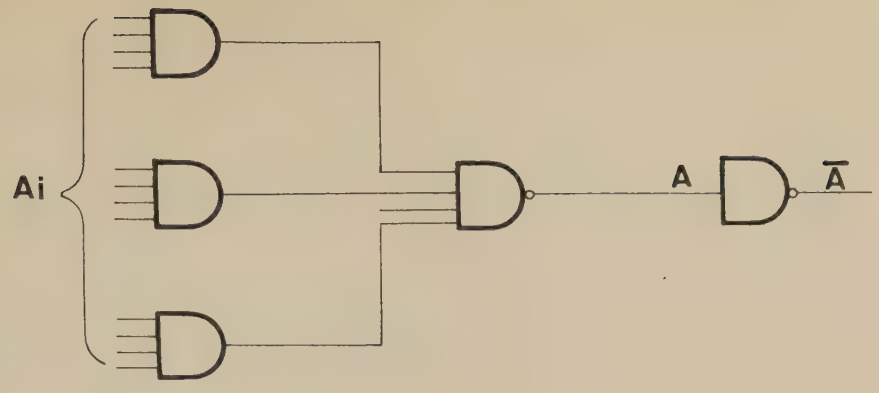
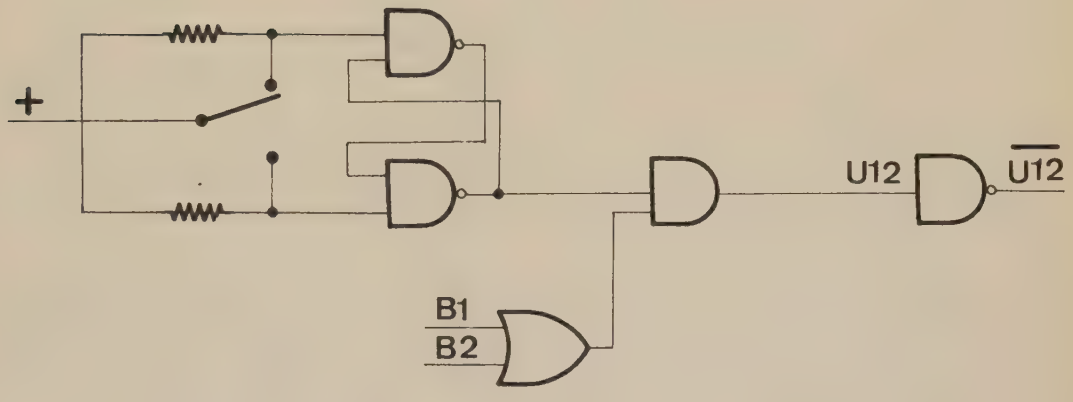

entrées
sorties automate
sorties processus
BPM
PU
PUτ
PAI
PAIτ
PE
PEτ
PH
PHτ
PN
PNτ
PC
PCτ
AU
AUU
TSR
m
A
TSF
UB1
UB2
U12
NB1
NB1τ
NB2
NB2τ
NBF1
NBF2
NBWD
NH1
NH2
NHF1
NHF2
V
R
mt1
mt2
B1
B2
TMT
NHD
NHB
NHBτ
NBFB
NHFB
LW
FC
T1
T2
T3
NHWD
SA1
SA7
SA2
SA3
SA6
U
AI
E
H
N
VEC
MU
MAI
ME
MH
MN
VS
VBS
A
MC
ACC
M
R1
R2
mt1
mt2
B1
B2
VE1
VE2
VUR
M1
M2
VF1
VF2
MT1
MT2
RM1
RM2
RB
PCMA
PCMO
CMA
CMO
CNO
VBM
VUR
PP
PR
VFF
SA1
SA2
SA3
SA6
U
VUK
VJN
VHL
VUZ
VJC
VFR
VBR
VUY
VUI
VUM
VUJ
VUA
VG2
VG1
VD1
VD2
VU1
VU2
VFO
VBO
VUO
VUW
VUD
VDO
VFF
PPF
PPD
PCMA
PCMO
CMA
CMO
CNO
PP
PR
M
MU
MAI
ME
MH
MN
CMT
MC

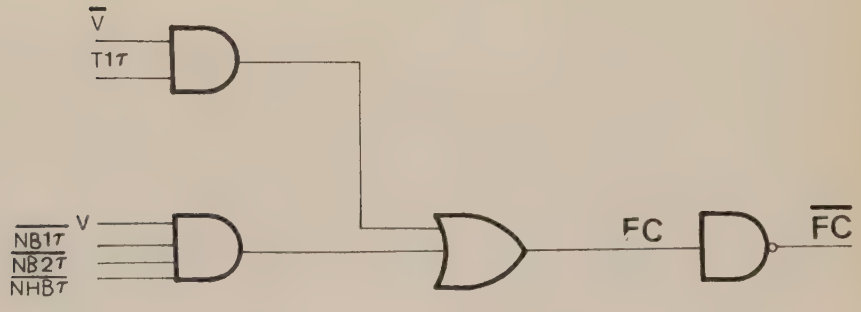
Fig 10.17.



Autorisation de fonctionnement automatique

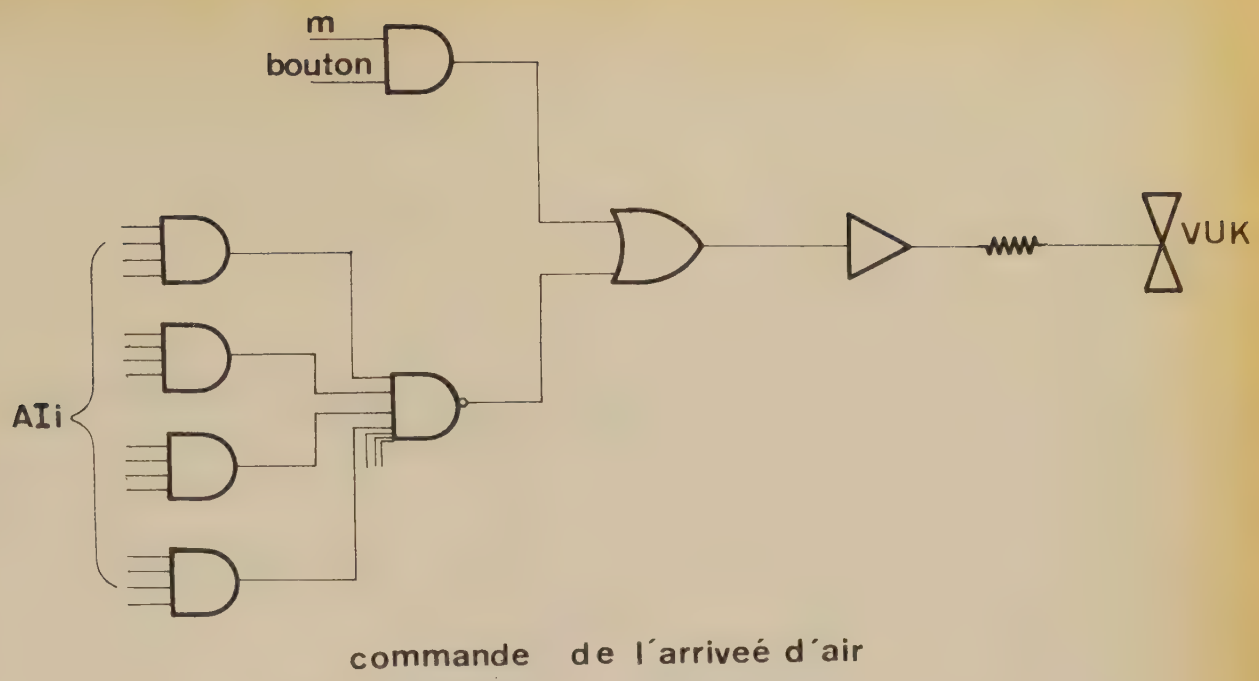


Remplissage des bacs U1 et U2

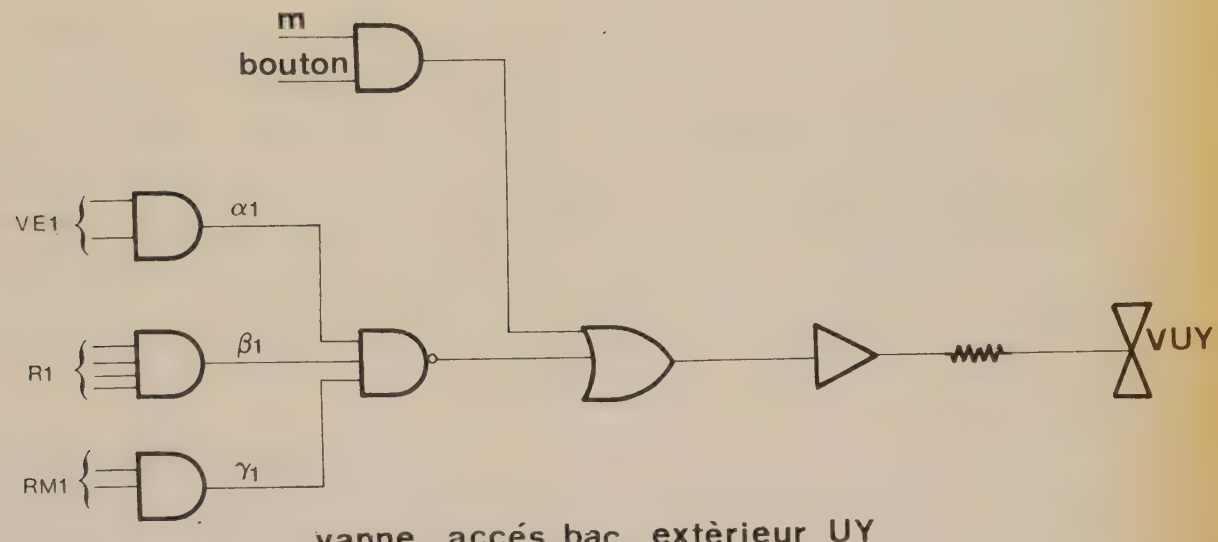


fin du cycle

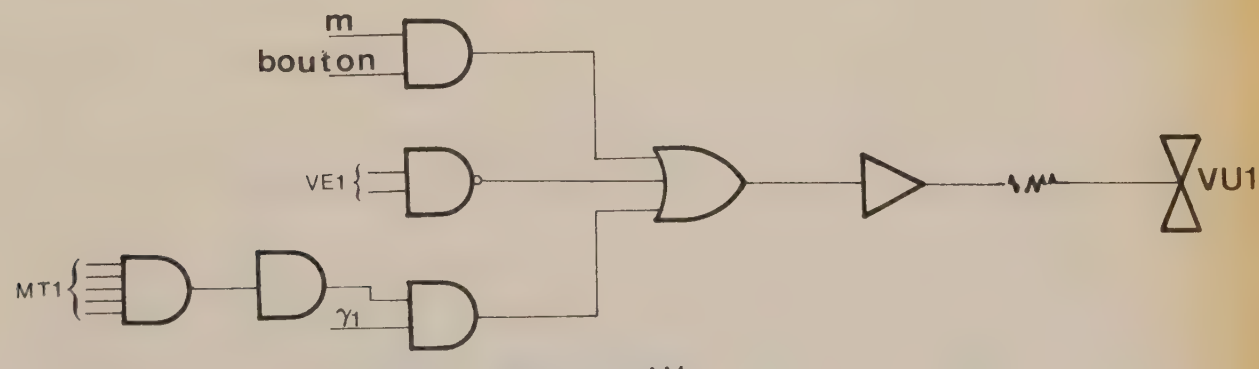
Fig 10.18. entreés de l'automate



commande de l'arriveé d'air



vanne accés bac extèrieur UY



vanne vidange U1

Fig 10.19. sorties réelles du processus

B I B L I O G R A P H I E

1 - SYNTHESE DES SYSTEMES SEQUENTIELS

[1] ARNOLD T.F. TAN C.J. NEWBORN M.M.

"Iteratively realized sequential circuits"
I.E.E.E. Transactions on computers C. 19, p. 54 à 66

Cet article envisage une méthode de synthèse systématique des systèmes séquentiels, le réseau en arbre ou matriciel résultant étant composé de cellules toutes identiques. Bien que présentant de nombreux avantages dans la perspective d'une intégration à grande échelle, cette structure géométrique simple est de taille relativement très importante et le problème de sa mise en conditions initiales n'a pas encore été étudié.

[2] BRZOZOWSKI J.A. SINGH S.

"Definite asynchronous sequential circuits"
I.E.E.E. Transactions on computers C. 17, p. 18 à 32

SINGH S.

"Asynchronous sequential circuits with feedback"
I.E.E.E. Transactions on computers C. 18, p. 440 à 450

Ces deux articles présentent une synthèse des systèmes séquentiels asynchrones au moyen de réseaux standards : "l'unité de retard asynchrone" ou AUD.

Toute machine asynchrone à mémoire finie à n entrées peut être réalisée par k AUD à n+ 1 entrées et n + 1 sorties et un circuit combinatoire. Le problème des aléas est facilement soluble quand une seule variation d'entrée est possible à la fois, mais la complexité du réseau AUD est une fonction très rapidement croissante du nombre d'entrées.

Le premier article donne les théorèmes fondamentaux, le second traite quelques exemples de systèmes à deux entrées.

[3] DAVID R.

"Réalisation de systèmes séquentiels asynchrones par interconnexion simple de cellules séquentielles identiques".

Thèse de Doctorat es-sciences. Grenoble. Avril 1969.

DAVID R.

"Synthèse de réseaux séquentiels cellulaires"
Automatisme n° 3 tome 15, p. 89 à 97

Ces ouvrages sont le point de départ de nos travaux. Comme [1] et [2] , la méthode proposée permet la synthèse des systèmes séquentiels asynchrones au moyen de cellules identiques. Les moyens de minimisation sont complets et en font une méthode qui semble de beaucoup la plus simple des méthodes connues actuellement.

La thèse traite de tous les principes et théorèmes de cette méthode ; l'article présenté dans Automatisme en donne un résumé.

[4] DAVID R. DESCHIZEAUX P.

"Synthèse d'automates finis"

Rapport DRME 1969 n° 68-34-338-00-480-75-01

DAVID R. DESCHIZEAUX P. LAURENT J.C.

"Synthèse de systèmes séquentiels"

Rapport DRME 1970 n° 69-400

DESCHIZEAUX P.

"Contribution à la conception assistée par calculateur des systèmes logiques".

Thèse de Doctorat es-sciences - Grenoble - Novembre 1971

Certaines parties de ces trois mémoires traitent de quelques extensions de la méthode proposée en [3] et plus particulièrement de la synthèse à partir des séquences entrée/sortie ou à partir des expressions régulières, de la synthèse automatique par calculateur à partir du tableau d'états et de la décomposition des automates.

[5] FERRARI D. GRASSELLI A.

"A cellular structure for sequential networks"

I.E.E.E. Transactions on computers C. 18, p. 947 à 956

La méthode traitée dans cet article est cellulaire pour la partie combinatoire des automates et l'optimisation est essentiellement axée sur la minimisation du nombre de variables internes de ces automates synchrones.

[6] FLORINE J.

"Automatismes à séquences et commandes numériques"

DUNOD. PARIS 1969.

Cet ouvrage propose diverses méthodes originales de synthèse des systèmes séquentiels, dont une utilisant des blocs séquentiels quelconques, et en donne des applications dans différents domaines, plus spécialement pour les moyens de calcul.

[7] LEBOURGEOIS F.

"Traitement de problèmes logiques et séquentiels par calculateur numérique. Application au contrôle d'une installation pilote de distillation"

Thèse de Docteur-Ingénieur. GRENOBLE 1967

Cette thèse traite particulièrement du problème de la décomposition des gros automates industriels. Par une méthode de partitions sur le procédé, le système peut être décomposé en plusieurs sous-systèmes possédant entre eux un nombre réduit d'interconnexions. Une application en est donnée pour le contrôle d'une colonne à distiller.

[8] MANGE D. DESARZENS P.

"Systèmes logiques séquentiels programmables SYSEP"

Systèmes logiques n° 2 avril 1970, p. 68 à 74. Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE.

Le réseau résultant de la méthode envisagée dans cet article est essentiellement constitué de circuits ET élaborant les 2^n minterms du système comportant p entrées

et n-p variables internes. Malgré les larges possibilités de l'intégration à grande échelle, le circuit prend vite une taille très importante. La synthèse doit utiliser comme critère, le nombre minimal de variables internes pour réduire l'élaboration des minterms.

[9] MUKHOPADHYAY A.

"Recent developments in switching theory"
Academic Press 1971

Cet ouvrage traite essentiellement des méthodes nouvelles de synthèse cellulaire pour les systèmes combinatoires. De très brèves idées sont émises pour le domaine séquentiel. Il met néanmoins l'accent sur tout l'intérêt des réseaux cellulaires pour l'intégration à grande échelle.

[10] NASLIN P.

"Circuits logiques et automatismes à séquences"
DUNOD. PARIS 1965

Les méthodes traditionnelles de conception des automates sont exposées dans cet ouvrage sous une forme simple et précise depuis l'énoncé du problème jusqu'à la réalisation. Par contre, l'aspect cellulaire de la synthèse n'est pas présenté, l'intégration à grande échelle des circuits, faisant intervenir de nouveaux critères, n'est apparue que depuis peu de temps.

[11] PERRIN J.P. DENOUETTE M. DACLIN E.

"Systèmes logiques"
DUNOD - PARIS 1967

Un grand nombre de méthodes de synthèse des systèmes logiques sont présentées dans cet ouvrage sous une forme très complète ; mais comme pour le précédent livre, l'aspect réalisation cellulaire n'apparaît pas.

[12] POULIQUEN N.

"Synthèse de table de fluence de systèmes séquentiels asynchrones à partir de relations entrée-sortie".

Thèse de Docteur-Ingénieur. GRENOBLE 1971

Cette thèse présente une méthode de synthèse effectuée entièrement par calculateur à partir des séquences entrée-sortie décrivant le fonctionnement des automates asynchrones. Le réseau est obtenu encore par minimisation du nombre des variables internes.

2 - INTEGRATION A GRANDE ECHELLE EN TECHNOLOGIE M.O.S.

[13] BOREL J. CRINON G.

"Optimisation des circuits intégrés logiques à transistors M.O.S. à canal à enrichissement"

Note d'étude LETI 1968

Ce fascicule, après avoir donné les caractéristiques générales du transistor M.O.S., fait apparaître les divers critères pour en optimiser son fonctionnement

aussi bien du point de vue rapidité que du point de vue consommation électrique et dimensions géométriques.

[14] DAVID R. LAURENT J.C.

"Principle and realization with M.O.S. technology of an universal all for asynchronous sequences"

International Seminar on applied aspects of the automata theory - VARNA 18-22 may 1971

LAURENT J.C. DAVID R.

"Synthèse cellulaire de systèmes séquentiels complexes définis par leur graphe primitif. Intégration à grande échelle"

Journée d'études : Automatismes logiques industriels. Conception et réalisation. PARIS 10 décembre 1971.

Ces deux articles, après avoir rappelé les principes fondamentaux du fonctionnement de la CUSA, donnent les caractéristiques générales de la réalisation intégrée à grande échelle telle qu'elle est étudiée dans ce mémoire. Le second article traite également de la synthèse des automates définis par leur graphe primitif.

[15] LACOUR J.

"Evolution des circuits intégrés M.O.S. vers la grande complexité"

Ecole d'été NATO - Septembre 1969.

Ce fascicule donne une bonne vue d'ensemble sur les circuits M.O.S. aussi bien du point de vue technologique (caractéristiques du T.MOS) que du point de vue possibilité de réalisation d'ensembles complexes sur une même puce de silicium.

[16] MACKOWIAK E.

"Cours sur les circuits intégrés de grande complexité à transistors M.O.S."

C.E.A. - C.E.N.G. - LETI - Cours 1970-71

Ce cours fait le point sur toutes les possibilités nouvelles des circuits intégrés M.O.S. et est particulièrement utile pour le côté technologique de cette méthode.

[17] VERGNIAULT M.

"Circuits intégrés de grande complexité à interconnexion programmée"

Note technique LETI 1970.

Ce rapport donne les résultats d'une étude de réalisation de circuits combinatoires ou synchrones complexes effectuée au LETI. Sur le réseau de cellules formées de portes NI toutes identiques, l'ensemble des interconnexions spécifie le système que l'on veut réaliser.

[18] JACOLIN LE FAOU PIMORT VERAN

"Simulation de circuits électroniques. Programme IMAG 2" Colloque international sur la microélectronique avancée. PARIS 6-10 avril 1970, p. 1128 à 1137.

Cet article décrit le mode de fonctionnement du programme IMAG 2 qui permet de simuler les circuits électroniques en régimes continu, alternatif et transitoire. Diodes et transistors sont étudiés sous forme de schémas équivalents composés de résistances et capacités. L'emploi de ce programme conversationnel est très aisé mais la complexité des circuits reste limitée.

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le

Le Président de la thèse

VU, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble